

Tino Hyttinen

Teollisuuskiinteistön pienjänniteverkon laskenta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

25.5.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tino Hyttinen Teollisuuskiinteistön pienjänniteverkon laskenta 36 sivua + 4 liitettä 25.5.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Lehtori Tuomo Heikkinen Osastopäällikkö Markku Ollikainen
<p>Insinöörityön tavoitteena oli laskea teollisuuskiinteistöön rakennettava pienjännitesähköverkko Neplan-ohjelmalla. Tavoitteisiin lukeutui havainnointi laskennan yhteydessä siitä, soveltuuko kyseinen ohjelma pienjännitealueen laskentaan. Tämä työ tehtiin Hepacon Oy:lle, jonka suunnittelema kohde on kyseessä.</p> <p>Jotta laskenta saatiin suoritettua, oli kerättävä tietoa kiinteistöön tuotavasta liittymästä, perehdyttävä kaapeleiden ominaisuuksiin ja niitä rajoittaviin tekijöihin sekä suojalaitteiden mitoittamiseen ja niiden toimintaperiaatteisiin.</p> <p>Työn aikana seurattiin jännitteenalenemia, oikosulkuvirtoja, kuormituksia nousukaapeleille sekä suojaavien sulakkeiden selektiivisyyttä. Näiden lisäksi havainnoitiin Neplan -ohjelman soveltuvuutta Hepacon Oy:lle pienjänniteverkkojen laskentaa ajatellen.</p> <p>Työn lopputuloksena tuotettiin standardien edellyttämiä laskennallisia arvoja teollisuuskiinteistön pienjänniteverkolle sekä arvioitiin Neplan -ohjelman soveltuminen yrityksessä tehtäviin pienjänniteverkkojen laskentoihin.</p>	
Avainsanat	pienjänniteverkko, verkostolaskenta, Neplan

Author Title	Tino Hyttinen Calculation of the Low Voltage Grid of Industrial Factory
Number of Pages Date	36 pages + 4 appendices 25 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer Markku Ollikainen, Head of electrical department
<p>The goal of this Bachelor's study was to calculate the low voltage grid for a factory with Neplan grid calculation program. Part the goal was also to determine how suitable the program in question is for low voltage grid calculations. This study was made for Hepacon Oy which is making the electrical designing for this specific factory.</p> <p>In order to accomplish the calculations, information regarding the connection to the grid, properties of the cables and what inhibits them had to be collected and got familiar with. Protective devices were also familiarized with.</p> <p>Values such as voltage drops in the low voltage grid, the loads on the cables based on voltage, currents of short circuits and the selectivity of the protective devices were observed during the study.</p> <p>The result of this study is produced calculated values of the low voltage grid according to the standards. The suitability of Neplan was estimated for calculating low voltage grids in Hepacon Oy.</p>	
Keywords	low voltage grid, grid calculation, Neplan

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Teollisuuskiinteistön sähkönjakeluverkko	2
2.1	Teollisuusverkon periaate	2
2.2	Verkkojen yleisimmät rakenteet	3
2.3	Teollisuusverkkojen jakelujärjestelmät	6
2.4	Teollisuuden pienjänniteverkon rakenne	8
3	Verkostolaskennassa huomioitavat käsitteet	10
3.1	Selektiivisyys	10
3.2	Kaapeleiden kuormitettavuus	11
3.3	Suojalaitteiden rakenne ja mitoitus	12
3.3.1	Ylivirtasuojaus	12
3.3.2	Ylikuormitussuojaus	13
3.3.3	Oikosulkusuojaus	15
3.3.4	Ylikuormitus- sekä oikosulkusuojauksen yhteensovitus	16
3.3.5	Vikasuojaus	17
3.4	Jännitteen alenema	19
3.5	Oikosulkuvirrat	21
3.5.1	Oikosulkuvirta sähköverkossa	21
3.5.2	Oikosulkuvirran laskenta	22
4	Verkostolaskennan lähtökohdat	24
4.1	Verkostolaskentaohjelma	24
4.2	Teollisuuskiinteistön tiedot	25
5	Verkon laskenta	28
5.1	Suunnittelun merkitys verkon laskennassa	28
5.2	Laskennan suorittaminen Neplan-ohjelmalla	30
5.3	Käsin laskennalla tuotetut vertailuarvot	32
5.4	Tulosten vertaileminen	33
6	Pohdinta	34

Liitteet

Liite 1. Tehonjakolaskennan tulokset.

Liite 2. Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat Neplan –ohjelmalla laskettuna.

Liite 3. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat Neplan –ohjelmalla laskettuna.

Liite 4. Sulakkeiden selektiivisyyden tarkastelu.

Lyhenteet

A	Ampeeri.
kj	Keskijännite.
kA	Kiloampeeri.
kV	Kilovoltti.
kVA	Kilovolttiampeeri.
kW	Kilowatti.
R	Resistanssi.
r.m.s.	root mean square (tehollisarvo)
V	Voltti.
X	Reaktanssi.
Z	Impedanssi.

1 Johdanto

Suurten rakennusten, kuten esimerkiksi teolliseen toimintaan tarkoitettujen kiinteistöjen, sähköverkon suunnittelu sekä verkon mitoittaminen on tärkeää. Mikäli kiinteistön sähköverkko suunnitellaan huonosti, se voi merkittävästi rajoittaa kiinteistössä toimivan yrityksen mahdollisuuksia valmistaa tuotteitaan markkinoille. Tämän lisäksi heikosti suunniteltu sekä alimitoitettu sähköverkko voi aiheuttaa jopa aineellisia vahinkoja esimerkiksi kaapeleiden liikakuormituksen johdosta.

Kiinteistöön rakennettavan sähköverkon laskenta ja mitoittaminen parantaa sen taloudellisuutta. Tämän lisäksi verkostolaskennan vaiheessa voidaan ottaa huomioon mahdollisesti tulevaisuuden tuomat kehitykset sekä laajennukset, koska nämä usein tarkoittavat lisää sähköenergiaa kuluttavia laitteita.

Sähköverkon laskennassa kiinnitetään huomiota siihen, että kaapelit ovat riittävän suuria kuljettamaan tarvittava määrä sähköä turvallisesti. Tämän lisäksi kaapeleille voidaan määritellä tarkoitukseen sopivat suojalaitteet, jotta vikatilanteet saadaan pysymään kurissa. Tänä päivänä suunnitteluyrityksillä käytössään olevilla verkostolaskentaan tarkoitettuilla ohjelmilla kyetään tarkastelemaan suunniteltua verkkoa erilaisissa tilanteissa sekä löytämään mahdollisia ongelmakohtia, joihin on ennen sähköverkon toteuttamista puututtava.

Tämän insinööriyön aiheena on laskea pääkaupunkiseudun lähistölle nousevan, elintarviketeollisuuteen suuntautuvan yrityksen, uuden kiinteistön pienjänniteverkko. Työn suorittamiseksi valittiin laskentaohjelmaksi kohdetta suunnittelevan yrityksen käyttämä verkostolaskentaohjelma. Tavoitteena on tuottaa luotettavia tuloksia pienjänniteverkkoa laskettaessa sekä arvioida ohjelman soveltuvuus yrityksen käyttöön.

Insinööriyö tehdään suunnittelu- ja konsultointiyritys Hepacon Oy:lle. Hepacon Oy on perustettu vuonna 1978, jonka toimitilat sijaitsevat Helsingin Malmilla. Yritys on itsenäinen, kotimaisessa omistuksessa oleva talotekniikan suunnittelutoimisto, joka keskittyy asiakkaidensa tarpeiden mukaisiin ratkaisuihin sekä konsultointipalveluihin. Hepacon Oy työllistää tällä hetkellä yli 60 suunnittelijaa opiskelijasta aina diplomi-insinööreihin asti.

2 Teollisuuskiinteistön sähköjakeluverkko

2.1 Teollisuusverkon periaate

Sähköjakeluverkot, jotka ovat tarkoitettu teollisen toiminnan kiinteistöihin, sisältävät ominaisuuksia, joita täytyy pitää silmällä verkkoa suunniteltaessa ja mitoittaessa. Teolliset kiinteistöt sijaitsevat maantieteellisesti pienellä alalla. Koska tällaiset kiinteistöt sisältävät mahdollisesti tehoiltaan isoja muuntajia, moottorikuormia sekä muita runsastehoisia laitteistoja, on kiinteistön vaatimat tehot isoja ja vaativatkin sitä, että liittyminen jakeluverkkoon on tarpeeksi vahva. Tämä tarkoittaa sitä, että jakeluverkon etäisyydet ovat verrattain lyhyitä, joista aiheutuu se, että verkon pisteissä olevat oikosulkuvirrat pysyvät suurina läpi verkon.

Teollisten kiinteistöjen liittymät yleiseen sähköverkkoon toteutetaan useimmiten 110 kV:n, 20 kV:n, 10 kV:n tai 0,4 kV:n jännitetasoilla. Jotta jännitetaso saadaan kiinteistön järjestelmille sopivaksi, sitä lasketaan muuntajilla tarpeelliseksi katsotuille jännitetasoille. Aikaisemmin mainittujen jännitetasojen lisäksi voidaan käyttää myös 6 kV:n sekä 3 kV:n tasoja.

Teolliset kiinteistöt ja ympäristöt saattavat sisältää erilaisia tiloja sekä olosuhteita, jotka täytyvät tulla huomioiduiksi järjestelmää suunniteltaessa. Nämä tekijät vaikuttavat myös olennaisesti mahdollisiin sähköverkon komponentteihin ja niiden valintaan. Näissä kiinteistöissä ja ympäristöissä on mahdollisesti eri lämpötiloja, sääolosuhteiden vaihteluita sekä teollisen toiminnan aiheuttamaa epäpuhtautta ja koneiden aiheuttamia mekaanisia haittoja, kuten tärinää ja iskuja. (1, s.6–8.)

Laitosten sisältämät käyttöjakelujärjestelmät pystytään jakamaan seuraavasti: tuotannon sähköjakelu, valaistus- ja huoltosähköverkko sekä apusähköjärjestelmät. Kiistatta suurimman osan sähkökulutuksen aiheuttaa moottorit. Suomessa niiden suosimat käyttöjännitteet ovat 10 kV, 6 kV, 3 kV, 690 V ja 400 V. Opinnäytetyössä tarkasteltava kohde käyttää viimeisimpänä mainittua jännitetasoa. Kun valitaan moottoreiden jännitetasoja, tulee ottaa huomioon niiden huipputehon suuruus, laitoksen suurimpien moottoreiden teho, alueen laajuus, mahdollisesti jo käytettävät jännitteet sekä myös kiinteistöä palvelevan jakelumuuntajan oikosulkuteho. Mikäli kiinteistöön sijoitetaan kovin suuria

moottoreita, niiden käynnistystilanteesta aiheutuva jännitteenalenema ei sallita aiheuttavan ongelmia muille verkkoon liitetyille laitteille tai laitteistoille sekä niiden toiminnalle.

Teollisuuslaitos voi käyttää useampaa kuin vain yhtä keskijännitetasoa, mutta pääjakelun jännitetasoksi määritellään se jännite, jolla jakelu pääosin toteutetaan ja johon on liitetty pääosissa jakelumuuntajia. Pääjakelun jännitetaso on useimmiten 690 V, 10 kV tai mahdollisesti 20 kV pois lukien pienet teollisuuslaitokset, joiden liittymäjännite on 0,4 kV, merkataan pääjakelun jännitetasoksi 0,4 kV.

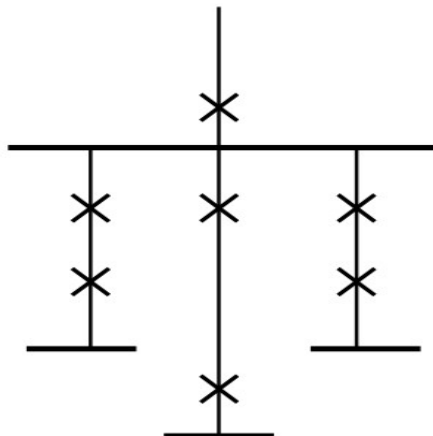
Nykyisin kun moottoriohjauksen halutaan olevan mahdollisimman optimaalista, käytetään runsaasti taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajilla kuitenkin on myös varjopuolensa, ne nimittäin synnyttävät verkkoon yliaaltoja, joiden leviäminen tulisi estää. Leviämisen estämiseksi on suositeltavaa kytkeä taajuusmuuttajaohjatut moottorit omaan sekä valaistus- ja huoltosähköverkko omaan jakelumuuntajaansa. (2.)

2.2 Verkojen yleisimmät rakenteet

Kuten sanottu, teollisuusverkoilla on sille kuuluvat ominaispiirteensä, kuten suuret tehot, mikä merkitsee pinta-alaltaan suuria kaapeleita, suuria muuntajia sekä oikosulkuvirtoja. Näiden seikkojen takia jo suunnitteluvaiheessa on mietittävä perusteellisesti, minkälaista verkkomallia lähdetään toteuttamaan jo senkin takia, että mitä suurempi laitos on kyseessä, sitä suuremmat ovat rahalliset tappiot, jotka mahdollisesta sähkönjakelun keskeytymisestä aiheutuu yhtiölle. Verkkorakenteet voidaan tiivistää kolmeen tyyppiin: säteittäis-, rengas-, sekä silmukkaverkkoon.

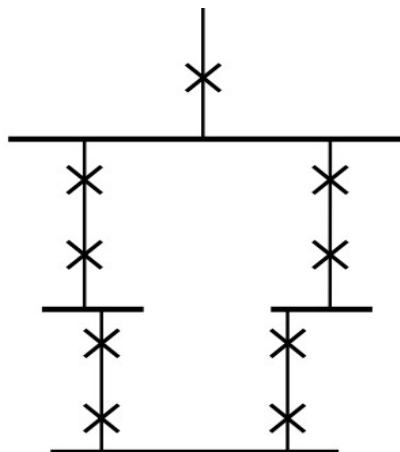
Säteittäisverkko (kuva 1) on näistä kolmesta verkkotyypistä yksinkertaisin sekä yleisimmin käytetty malli keski- sekä pienjännitejakelun saralla. Verkkomallin ehdottomiin hyviin puoliin lukeutuu se, että selektiivisyys on muihin verkkomalleihin verrattuna helppoa toteuttaa. Tämä tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa kyseessä oleva vika saadaan rajattua mahdollisimman pienelle alueelle. Tämän lisäksi selkeän rakenteensa ansiosta se on taloudellisesti halvin toteutettuna sekä sen mitoittaminen on helppoa. Verkko sisältää myös omat heikot puolensa. Koska sen rakenne on suoraviivainen, sen ongelmat esiintyvät vika- ja huoltotilanteiden aikana. Mikäli verkossa jokin osa menee epäkuntoon, sen

jälkeen tulevalle verkon osalle on hankalaa järjestää varavoimaa eikä verkon huoltamistapauksissa ei voida säästyä tuotannon keskeyttämisiltä. (3.)



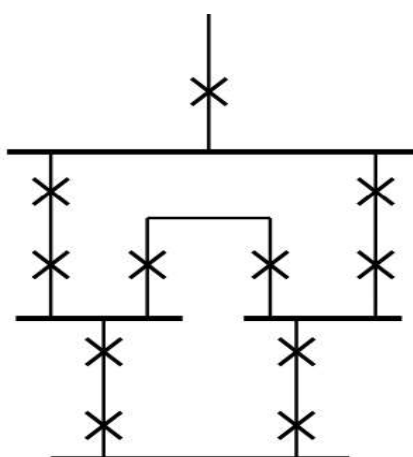
Kuva 1. Säteittäisverkko (3.).

Rengasverkon mallia (kuva 2) suositaan, kun jännitetasot kasvavat. Rengasverkon periaate perustuu nimensä mukaiseen muotoonsa eli verkko rakennetaan rengasmaiseksi. Tässä verkkomallissa on selkeänä erona se, että sähköenergian siirtäminen on helppoa varmistaa toista verkon muodostamaa reittiä pitkin. Rengasmaisesta muodosta on etuna myös se, että jännitelaatu on tasaisempaa eikä verkossa ole niin suuria tehohäviöitä kuin esimerkiksi edellä mainitussa säteittäisessä verkkomallissa. Tässä mallissa kuitenkin selektiivisyyden toteuttaminen ei ole helppoa, mikä oli edellä mainitun verkkomallin yksi suurimmista vahvuuksista. Selektiivisyyden toteuttaminen ei ole yksinkertaista, koska jännitteen syötöillä on useita mahdollisia reittejä. Tämä vaatii myös erityistä huomiota huolto- ja korjaustöiden aikana, koska sähkönsyöttö siltä verkon osalta on saatava jännitteettömäksi joka suunnasta. (3.).



Kuva 2. Rengasverkko (3.).

Silmukkaverkko (kuva 3) samastuu hyvin paljon edellä käsitellyn rengasverkon kanssa ja käytetäänkin kantaverkkojen mallina 220 kV ja 400 kV jännitealueilla. Poikkeuksena rengasverkkoon on rengasmaisen rakenteen sisällä olevat väliin rakennetut yhteydet. Tällä parannetaan sekä varmennetaan vielä entisestään jännitelaatua, sähkönsyötön varmuutta sekä jo mainitut sähkönsiirrossa ilmenevät tehohäviöt laskevat. Koska mahdollisia syöttösuuntia tulee lisää, nousevat myös verkkomallin kustannukset lisääntyvien ja vaadittavien monimutkaisten relejärjestelmien myötä. Tämä myös lisää tarvetta huolto- ja korjaustöiden aikaisesta huolellisuudesta, jotta mahdollinen huollettava tai korjattava alue tulee saatettua jännitteettömäksi jokaiselta mahdolliselta sähkönsyötön suunnalta töiden ajaksi. (3.)



Kuva 3. Silmukkaverkko. (3.)

2.3 Teollisuusverkkojen jakelujärjestelmät

Opinnäytetyössä käsiteltävässä kohteessa kiinteistön sisäinen jännitetaso on 400 V. Kun teollisuuskäytöissä jännitetasona on enintään 1000 V, käytetään useimmiten käyttömaadoitettua TN-S-järjestelmää tai vastuksen kautta maahan yhdistettyä IT-järjestelmää.

Kuten aiemmin mainittiin, teollisissa kiinteistöissä on paljon kulutuslaitteistoja, kuten erilaisia koneita. Koneet, kuten pyörivät sähkömoottorit, ovat useimmiten kolmivaiheisia, joten suurienkin tehojen siirtäminen on vaivattomampaa. Teollisuuslaitoksissa on myös mahdollista törmätä kaksivaiheisiin kuormapiireihin, kuten esimerkiksi ohjausjärjestelmien muuntajat kytkettynä kahden vaiheen välille muodostavat sellaisen. Kiinteistön yksivaiheisia kuormia tyypillisimmin tämänkaltaisissa kohteissa ovat tilojen valaistus, pistorasiat ja pienemmät moottorit.

Kuvassa 4 on esitetty IT-järjestelmän rakenteen periaate. Tämän järjestelmän käyttö on mahdollista, mikäli jakelu tapahtuu saman haltijan laitteistoon. IT-järjestelmän laitteistoihin kuuluu maasulun valvonta- ja etsintälaitteet, jotka ovat TN-S-järjestelmästä tutun vikavirtavalvonnan sijalle asetetut. Etuna tässä järjestelmässä on, että yksivaiheinen maasulku ei aiheuta vikatilanteessa välitöntä käyttökeskeytystä. Maadoittaminen tapahtuu maadoittamalla järjestelmän muuntajan tähtipiste vastuksen kautta. Katkeileva maasulku aiheuttaa järjestelmään ylijännitteitä, joihin on syytä varautua. Jotta ylijännitteet saadaan rajoittumaan sallittuihin arvoihin, on vikapaikan ja tähtipisteen kautta kulkeutuva maasulkuvirta oltava yhtä suuri kuin kaapeliverkon maakapasitanssista aiheutuvan kapasitiivisen virran.

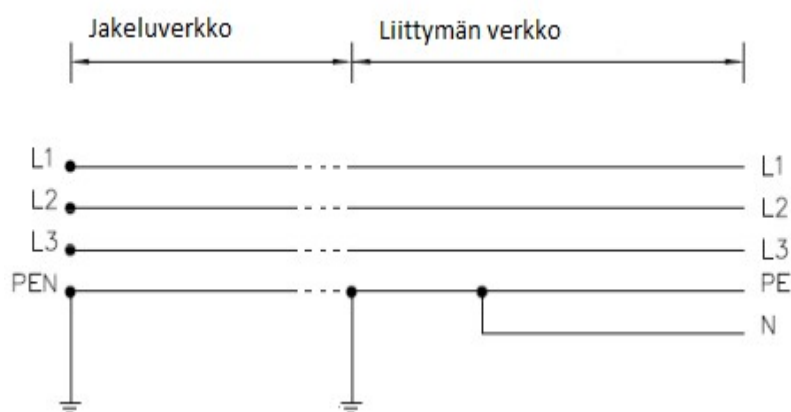
Kun tähtipistevastus sijoitetaan pienjännitekeskukseen, tulee ottaa huomioon pitkäkestoisien maasulkuvirran muodostama lämpö sekä vastusketjun päiden välillä oleva täysimittainen jännite. IT-järjestelmän käyttämä jännite 500 V tai 690 V. (1, s.9.)



Kuva 4. IT -järjestelmän rakenne (1, s.9).

Kuvassa 5 esitetään TN-S -järjestelmän rakenteen periaate. TN-S-järjestelmä vaatii nol-lajohtimesta erillisen suojajohtimen. Tämä mahdollistaa palaavan yksivaiheisen kuorma-virran pysymisen nol-lajohtimessa, joten häiriövirrat ja -kentät kestävät niin pieninä kuin mahdollista.

Järjestelmän pääkeskuksessa käytetään liittymispisteen pääkojeena kuormakytkintä tai katkaisijaa. Kuormakytkimen avulla keskus on turvallinen saattaa jännitteettömäksi kes-kijännitepuolella sijaitsevalla katkaisijalla. Myös jännitteet järjestelmien välillä eroavat, kun TN-S-järjestelmä käyttää useimmiten 400 V:a. (1, s.9–13.)

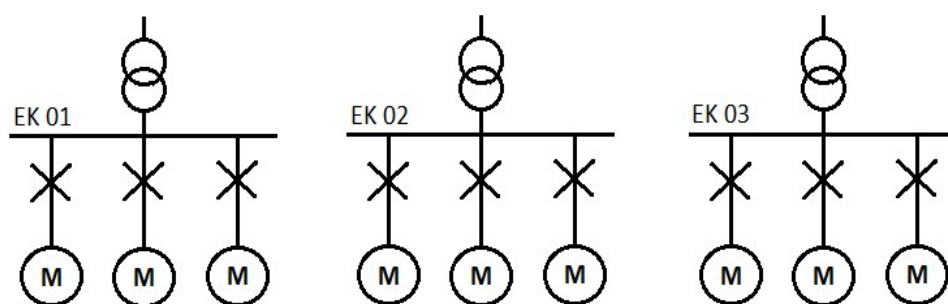


Kuva 5. TN-S -järjestelmän rakenne (1, s.9).

2.4 Teollisuuden pienjänniteverkon rakenne

Kun puhutaan teollisen kiinteistön verkon rakenteista, niiden rakennetyypit voidaan tiivistää kolmeen pääkategoriaan: keskitettyyn jakeluun, porrastettuun jakeluun sekä hajautettuun jakeluun. Todellisuudessa teollisuuskiinteistön verkot voivat sisältää vaikutteita esimerkiksi kaikista kategorioista otoksia.

Kun puhutaan keskitetystä jakelusta, tarkoittaa se pääasiassa sitä, että kaikki moottoreiden lähdöt ovat keskitettyinä pääkeskuksiin. Järjestelmä on yksinkertainen toteuttaa jos senkin vuoksi, että kyseiset kojeistot voidaan sijoittaa yhteen ja samaan sähkötilaan. Tämä rakennemalli vaatii kuitenkin komponenteiltaan erinomaisen oikosulkukestävyyden, ja sen lisäksi mahdolliseksi ongelmaksi voi koitua häiriöiden vaikuttaminen koko keskuksen syöttämälle tuotanto- tai palvelualueelle. Kuvassa 6 on esitetty keskitetyn jakelun periaate. (1, s. 11–12.)

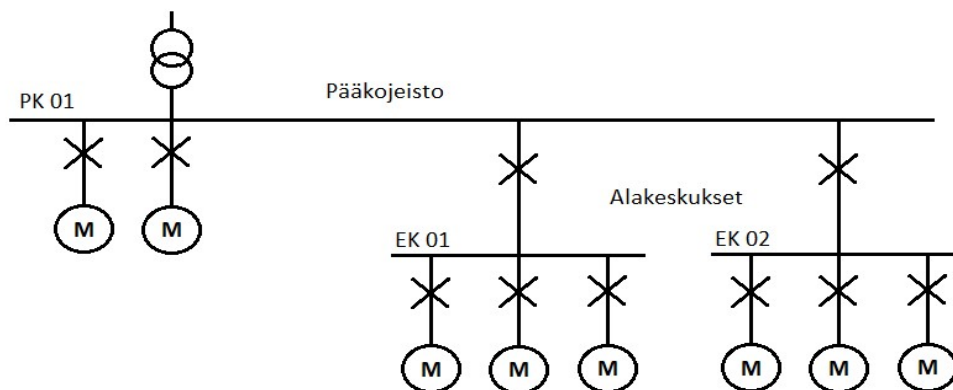


Kuva 6. Keskitetty jakelu (1, s.12).

Porrastetussa jakelussa (kuva 7) käytetään hyväksi rakentamalla jakelujärjestelmä siten, että pääkeskuksen jälkeen käytetään alakeskuksia, jotka voidaan kaapeloinnin optimoimiseksi sijoittaa lähelle syötettäviä laitteita ja laitteistoja. Erona keskitettyyn jakeluun tämä tapa helpottaa oikosulkuvirtojen kanssa, koska niitä voidaan rajoittaa alakeskusten yhteydessä. Tämän lisäksi keskusten porrastaminen mahdollistaa erityyppisten kuormalähtöjen ryhmittämisen eri keskuksiin, eli alakeskukset voidaan mitoittaa erikokoisiksi verrattuna toisiinsa.

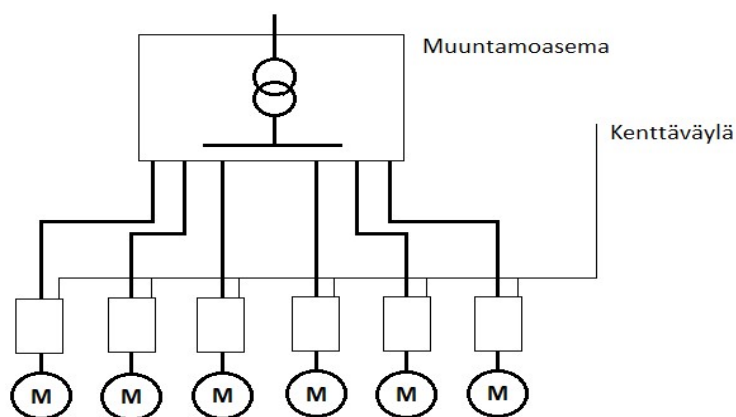
Alakeskusten ollessa nimellisvirroiltaan alle 1 kA:n, voidaan keskuksen lähtöjä suojata oikosuluilta sulakkeilla, joka tarkoittaa myös säästöjä kustannuksissa. Mikäli kuitenkin

kiinteistössä on suuritehoisia koneita, on ne syytä sijoittaa suoraan pääkeskukseen. (1, s.12.)



Kuva 7. Porrastettu jakelu (1, s.12).

Hajautettu jakelujärjestelmä on kustannuksiltaan pieni, koska järjestelmä suosii standardienmukaisia toteutuksia sekä ohjaus tapahtuu kenttäväyliä hyväksikäyttäen. Tämän-tyyppisessä jakelussa kiinteistössä oleville moottoreille ja laitteille kuuluvat ohjauslaitteistot sijoitetaan niiden välittömään ympäristöön sekä varsinainen sähkön syöttäminen tapahtuu standardirakenteisilla tehdasmuuntamoilla. Kuvassa 8 on esitetty periaatteellisesti hajautettu jakelu. (1, s.13.)



Kuva 8. Hajautettu jakelu (1, s.13).

3 Verkostolaskennassa huomioitavat käsitteet

3.1 Selektiivisyys

Selektiivisyys on tärkeä huomioitava käsite teollisuuden sähköverkkoa suunniteltaessa. Selektiivisyydellä tarkoitetaan suojalaitteiden toimintaa, joka pyritään toteuttamaan niin, että ongelmapaikkaa lähin suojalaite toimisi. Näin saadaan kyseinen ongelma rajattua mahdollisimman pienelle alueelle. (4, s. 2.) Hyvin suunnitellulla sähköverkolla, jossa selektiivisyys on saatu optimoitua, voidaan säästää huomattavia summia vikatilanteissa, koska mahdolliset suuret tuotannolliset koneet voivat jatkaa toimintaansa niihin vaikuttamattomasta viasta huolimatta. Seuraavaksi käsitellään mahdollisia selektiivisyyden malleja, joilla se voidaan toteuttaa.

Aikaselektiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että suojalaitteiden tulisi olla aseteltu toiminta-aikoja tarkastellessa siten, että sähkönjakelun loppupäässä suojalaitteen toiminta-aika on lyhyempi kuin esimerkiksi jakelun alkupuolella olevalla suojalla. Kun suojalaitteiden toimintakäyriä valitaan ja aikoja ”hidastetaan”, saadaan aikaan aikaselektiivisyys. Selektiivisyyden toteutusta ajatellen aikaselektiivisyys on kaikista tavoista luotettavin ja yksinkertaisin tapa, mutta mikäli sarjassa on useita suojalaitteita, voi mahdollisesti käytettävä aika olla riittämätön. Tällaisessa tilanteessa virtojen mukaan toimivat suojalaitteet tulevat kyseeseen, koska samalla toiminta-ajalla olevat laitteet voidaan asettaa vikavirtojen perusteella selektiivisiksi. Tämä onnistuu vain, jos vikavirtatasot ovat tarpeeksi tarkasti tiedossa. (4, s. 2–3.)

Suuntaselektiivisyys on käsite, jota käytetään enimmäkseen jakeluverkkojen piirissä. Tätä tapaa hyödynnetään, kun kysymyksessä on mahdollisesti rengasverkkoja tai verkossa on useita syöttölähteitä eri puolilla. Suojareleet tarkastelevat vikavirtatasojen ohella virran suuntaa. Sen perusteella suojaus havaitsee esimerkiksi rengasverkosta viallisen osan, joten kunnossa oleva verkon osa jatkaa toimintakuntoisena.

Lukitus suojaus on suurjännitteiden parissa käytettävä tapa, jonka toiminta perustuu ylempänä olevalle katkaisijalle lähetettävään lukituskomentoon katkaisijalta, jonka läpi kulkee vikavirtaa. Jotta katkaisija voitaisiin lukita, sen toiminnan tulee olla hidastettu. Vyöhykeselektiivisyyden toimintaperiaate on sama, mutta termiä käytetään pienjännitealueiden lukitus suojauksesta. (4, s. 4).

3.2 Kaapeleiden kuormitettavuus

Kohteiden suunnittelussa kaapeleiden mitoitus tulee eteen siinä vaiheessa, kun kohteeseen sijoitettavat kulutuslaitteet sekä niiden sijainnit tiedetään. Tämä mahdollistaa sen, että tiedetään, kuinka paljon kuormaa sekä mittaa kaapeleille tulee, joten sen koko voidaan optimoida ottaen huomioon SFS 6000 -standardin määrittämät korjauskertoimet.

Kaapeleiden kuormitettavuus määräytyy sille suurimman sallitun lämpötilan mukaan eikä sille jatkuvasti sallittua lämpötilaa voida ylittää. Jatkuvan lämpötilan ylittäminen lyhentää kaapelin mahdollista käyttöikää, koska se nopeuttaa kaapelissa käytetyn eristemateriaalin vanhenemista. Pahimmassa tapauksessa ylikuumeneminen voi aiheuttaa tulipalon.

Kaapeleiden kuormitettavuutta ei voida yksinomaan niille sallittujen lämpötilojen perusteella määritellä, vaan tämän tiedon lisäksi tarvitaan tietoja mahdollisista kuormitusvirroista. Näiden seikkojen lisäksi mitoittaessa tulee tietenkin myös ottaa huomioon taloudellisuus, mahdolliset jännitehäviöt sekä kyseessä olevan virtapiirin suurimman sallitun impedanssin muodostamat rajoitteet.

Vuonna 2017 uudistetussa SFS 6000 -standardissa on siirrytty käyttämään samoja ilman sekä maan referenssilämpötiloja sekä maan lämpöresistiivisyys arvoa kuin IEC 60364-5-523 -esikuvastandardi käyttää. Aiemmin Suomessa käytettiin näistä niistä poikkeavia arvoja. Ennen Suomessa oli käytössä ilmalle 25°C:n arvo, kun se nykyään on 30°C. Vastaavasti maahan asennettavien kaapeleiden maan lämpötilan referenssiarvo nykyisin on 20°C ennen käytetyn 15°C:n sijasta. Tämän lisäksi maan lämpöresistiivisyys on muuttunut 2,5 K m/W arvoksi, entisen 1,0 K m/W arvon sijaan. (5, s.224.)

Kuormitettavuustaulukoita on olemassa useita, koska ne ovat useamman eri tekijän määrittelemiin olosuhteisiin. Taulukot ovat jaettu erikseen yksi- ja kolmivaihepiireille, PVC- sekä PEX-eristeisille kaapeleille sekä näiden lisäksi asennustavat on jaettu yhdeksään eri ryhmään kuormitettavuuden näkökulmasta.

Tarkoin mitoitettu kaapeli on kuitenkin perusteltua tilanteessa, jossa esimerkiksi kaapelille laskettava kuormitettavuus on jossain kohtaa sen kulkemaa reittiä huomattavasti alhaisempi kuin muissa kohdissa. Vaikka taulukoita on useita erilaisia ottaen huomioon

mahdollisimman monet tilanteet, ei kuitenkaan täysin yksityiskohtainen, kuormitettavuuden perusteella oleva mitoitus ole tarpeen. (5, s.224.)

3.3 Suojalaitteiden rakenne ja mitoitus

Kun kulutuslaitteen tai laiteryhmän vaatimat virta-arvot tiedetään sekä kaapeli on valittu sen kulkeman reitin ja kuljettaman virran perusteella, on kaapelille valittava sitä suojaava suojalaite.

3.3.1 Ylivirtasuojaus

Ylivirtasuojauksella suojataan nimensä mukaisesti johdinta tai kaapelia ylivirtojen vaikutuksilta. Mikäli kiinteä asennus on suojattu ylivirtasuojalla, sen tehtäväksi ei kuitenkaan lukeudu kyseiseen asennukseen liitettäviä kulutuslaitteita ylikuormitukselta eivätkä välttämättä suojaa myöskään kiinteään asennukseen liitettäviä kaapeleita, jotka kytketään pistokytkimellä itse asennukseen. Suojalaitteita on kolmea tyyppiä: suojalaitteet, jotka suojaavat ylikuormitus- ja oikosulkuvirroilta, ylivirtasuoja, joka toimii ainoastaan ylikuormitussuojana ja ylivirtasuoja, joka toimii vain oikosulkusuojana.

Suojalaite, joka suojaa sekä ylikuormitus- että oikosulkuvirroilta, on yleinen sekä toimii useimmiten myös vikasuojauksessa. Tässä tapauksessa tätä suojalaitetta mitoittaessa tulee ottaa huomioon SFS 6000-standardin luvun 41 vaatimukset, jotka liittyvät sähköis-kuilta suojaamiseen. Kun valitaan kyseessä olevan kaltainen suojalaite, tulee sen nimellisvirta valita niin, että se suojaa kaapelia ylikuormittumasta ja oikosulkusuojaus toteutuu, kunhan suojalaitteen katkaisukyky on vähintään suurimman prospektiivisen oikosulkuvirran kokoinen. Prospektiivisella oikosulkuvirralla tarkoitetaan virtaa, joka kulkisi, jos oikosulkuvirtapiiri korvattaisiin ideaalisella merkityksettömän pienellä impedanssilla muuttamatta syöttöjärjestelmää. Mikäli tätä suojalaitetta käytetään, kun kyseessä on pienet oikosulkuvirrat, se toimii kuten ylikuormitustilanteessa. Esimerkkejä laitteista, jotka suojaavat sekä ylikuormitukselta että oikosulkuvirralla, ovat ylikuormituslaukaisijalla varustettu katkaisija, katkaisija varokkeen yhteydessä tai varoke, joka on varustettu gG-tyyppin sulakkeella.

Kun kyseessä on ylivirtasuoja, joka toimii vain ylikuormitussuojana, puhutaan esimerkiksi moottorisuojakytkimestä. Moottorisuojakytkimen lisäksi esimerkiksi sulake tai johdon-suojakatkaisija kykenee toimimaan ylikuormitussuojana, mikäli suojalaitteen katkaisukyky ei riitä. Kun käytetään erillistä ylikuormitussuojaa, oikosulkusuoja voidaan toteuttaa nimellisvirraltaan isommalla laitteella kuin on suojattavan kaapelin jatkuva kuormitettavuus. Tämän kaltaisten suojalaitteiden toiminta-aika on kääntäen verrannollinen virtaan, ja tämän lisäksi katkaisukyky saattaa olla alhaisempi kuin verkon prospektiivinen oikosulkuvirta kohdassa, jossa suojalaite sijaitsee.

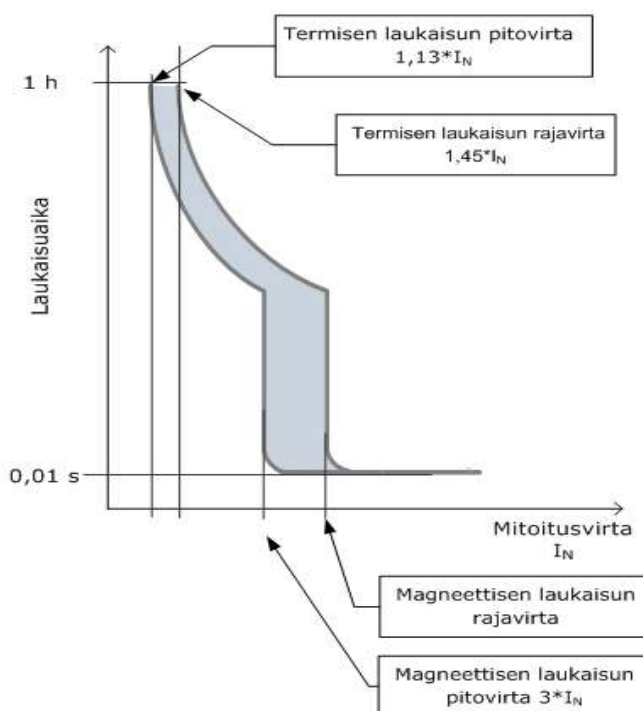
Ylivirtasuojan, joka toimii vain oikosulkusuojana, tulee asennettavaksi siinä tapauksessa, jolloin ylikuormitussuojaus toteutetaan toista tapaa hyödyntäen tai standardin SFS 6000 luku 433 sallii sen jätettävän pois. Tällaisen ylivirtasuojan nimellisvirta ei saa olla suurempi kuin se, mikä on merkitty ylikuormitussuojaan suurimmaksi sallituksi etusulakkeen nimellisvirraksi. Ylivirtasuojia, jotka soveltuvat vain oikosulkusuojaksi, ovat esimerkiksi varokkeita, jotka ovat varustettu gM- tai aM-tyyppisillä sulakkeilla tai katkaisijoita, jotka ovat varustettu oikosulkulaukaisijoilla. Kun käytetään erillistä oikosulkusuojaa, täytyy useimmiten virtapiirissä olla erillinen ylikuormitussuoja. Tämän ylikuormitussuojan nimellisvirta ei saa olla suojattavan kaapelin jatkuvaa kuormitusta suurempi. (5, s.135–136; 6, s.115.)

3.3.2 Ylikuormitussuojaus

Kun kaapeleille suunnitellaan ylikuormitussuojausta, tulee sen mitoituksessa ottaa huomioon suojalaitteen nimellisvirran ohella huomioon sen erilaiset toiminta-arvot. Ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi johdonsuojakatkaisijoilla tai sulakkeilla. Tämä voidaan toteuttaa myös ilma- tai kompaktikatkaisijoilla, joissa toimintavirta pystytään asettelemaan manuaalisesti. Se tulee kuitenkin asetella korkeintaan kaapelin kuormitettavuuden suuruiseksi.

Kun ylikuormitussuojauksena käytetään johdonsuojakatkaisijoita, se tekee mitoituksesta helppoa, koska niiden terminen toimintaraja virta on 1,45 kertaa suojalaitteen nimellisvirta. Johdonsuojakatkaisijat yleisimmät tyypit ovat B-, C-, D- ja K -tyyppi. Tyypit eroavat toisistaan niiden toimintakäyrien vuoksi ja palvelevatkin erilaisia kuormia. Valittaessa johdonsuojakatkaisijaa ja sen tyyppiä, tulee ottaa huomioon, onko suojattavassa ryhmässä esimerkiksi käynnistysvirtoja tai onko kuorma epälineaarista. B-tyypin

johdonsuojakatkaisijoita käytetään usein resistiivisillä kuormilla, kuten sähkölämmitystä tai lämminvesivaraajaa. C-tyyppi palvelee parhaiten normaaleja kuormia, kuten valaistusta tai pistorasioita. D-tyyppi soveltuu eritoten kuormille, jotka sisältävät mahdollisesti suuria käynnistysvirtoja. Esimerkkejä tällaisista kuormista ovat suuret moottorit. K-tyyppi on kuten D-käyrä ja sitä käytetäänkin suojaamaan esimerkiksi moottoreita sekä muuntajia. K-tyyppi eroaa kolmesta muusta edellä mainitusta tyypistä myös siten, että sen terminen toimintarajavirta on 1,2 kertaa suojalaitteen nimellisvirta ja onkin tarkempi ylikuormituksen suojaamiseksi. On olemassa myös Z- ja A-laukaisukäyriä omaavia johdonsuojakatkaisijoita, mutta on tarkoitettu lähinnä elektroniikkaosien ja ohjausvirtapiirien suojaamiseen. Kuvassa 6 on esitetty johdonsuojakatkaisijan toimintarajavirrat. (5, s.137, 7.)



Kuva 9. Johdonsuojakatkaisijan toimintarajavirrat (7).

Ylikuormitussuojausta toteutettaessa sulakkeilla, on niiden ylempi sulamisrajavirta korkeampi kuin 1,45 kertaa sulakkeen nimellisvirta. Ylemmällä sulamisrajavirralla tarkoitetaan virtaa, jolla sulake toimii varmasti yleensä tunnissa. Tämän takia sulaketta valittaessa ylikuormitussuojaksi ei sitä voida valita suoraan kaapelin kuormitettavuuden mukaan. Tätä varten on muodostettu kaava, jolla mitoitus voidaan suorittaa:

$$k \cdot I_n \leq 1,45 \cdot I_z \quad (1)$$

I_n on suojalaitteen nimellisvirta

I_z on johtimen jatkuva kuormitettavuus

k on sulakkeen ylemmän sulamisrajavirran ja nimellisvirran suhde

3.3.3 Oikosulkusuojaus

Kun käsitellään oikosulkusuojausta, sille asetetaan kaksi keskeistä vaatimusta. Ensinnäkin sen on kyettävä katkaisemaan suurin mahdollinen virtapiirissä esiintyvä oikosulkuvirta. Tämän lisäksi poiskytkennän on tapahduttava ennen kuin kyseessä olevan suojalaitteen suojaamat virtapiirit mahdollisesti vaurioituvat. Toisin sanoen missä tahansa virtapiirin kohdassa esiintyvät oikosulun aiheuttamat virrat täytyy katkaista viimeistään niissä aikamääreissä, jotka eivät ylitä aikaa, jolloin johdin tai kaapeli saavuttaa suurimman sallitun rajalämpötilan.

Oikosulkusuojausta suunniteltaessa, se tulee suunnitella SFS 6000-standardin kohdan 434.5.2 mukaan, jotta kaikki vaatimukset täytyisivät. Tarkoituksena on, ettei kaapelin tai johtimen terminen rasitus saa ylittää suojalaitteen läpi laskemaa energiaa. Se voidaan useimmiten varmistaa, kun arvot tarkastetaan valmistajien tuottamista käyristä sekä taulukoista. SFS 6000-standardin kohta 434.5.2 sisältää kaavan:

$$t = (k \cdot S / I)^2 \quad (2)$$

t on kesto aika sekunteina

S on johtimen poikkipinta (mm²)

I on oikosulkuvirta (A) tehollisarvona (r.m.s.)

k on kerroin, joka ottaa huomioon johdinmateriaalin resistiivisyyden, lämpötilakertoimen ja lämmönvarauskyvyn sekä sopivat alku- ja loppulämpötilat.

Taulukko 1. SFS 6000 -standardin 43.1 taulukko (6, s.121).

Ominaisuus/ olosuhde	Johtimen eristys							
	PVC Kestomuovi		PVC Kestomuovi 90 °C		EPR PEX Kertamuovi	Kumi 60 °C	Mineraali	
							PVC päälystämätön	Paljas päälystetty
Johtimen poikki-pinta-ala mm ²	≤ 300	> 300	≤ 300	> 300				
Alkulämpötila °C	70		90		90	60	70	105
Loppulämpötila °C	160	140	160	140	250	200	160	250
Johtimen materiaali:								
Kupari	115	103	100	86	143	141	115	135 -115 ^a
Alumiini	76	68	66	57	94	93	–	–
Kuparijohtimien tinajuotetut liitokset	115	–	–	–	–	–	–	–
^a Tätä arvoa pitää käyttää kosketeltavissa oleville paljaille johtimille.								
HUOM. 1 Muut kertoimen k arvot ovat harkittavana: – pienille johtimille (erityisesti alle 10 mm ² poikkipinnoille) – muun tyyppisille johtimien liitoksille – paljaille johtimille. HUOM. 2 Oikosulkusuojan mitoitusvirta voi olla suurempi kuin kaapelin kuormitettavuus. HUOM. 3 Yllä olevat arvot perustuvat julkaisuun IEC 60724. HUOM. 4 Kertoimen k laskemiseksi katso SFS 6000-5-54 liite 54A.								

Taulukosta 1 selvitetään k-muuttujalle arvo tilanteen mukaan. (5, s.142–143; 6, s.118–121.)

3.3.4 Ylikuormitus- sekä oikosulkusuojauksen yhteensovitus

Kun suojaukset toteutetaan yhtä suojalaitetta käyttäen, mitoitetaan esimerkiksi sulake ylikuormitussuojaksi. Tämän seurauksena sen katkaisukyky riittää ja soveltuu täten myös oikosulkusuojaksi ja suojaa johdinta tai kaapelia lämpenemiseltä, oli oikosulkuvirran suuruus mikä tahansa.

Kun suojaus toteutetaan erillisillä suojalaitteilla, valitaan laitteiden ominaisuudet siten, että oikosulkusuojana toimivan laitteen läpi menevä energia ei kasva niin suureksi, ettei ylikuormitussuojana toimiva laite sitä kestäisi ilman vaurioitumista.

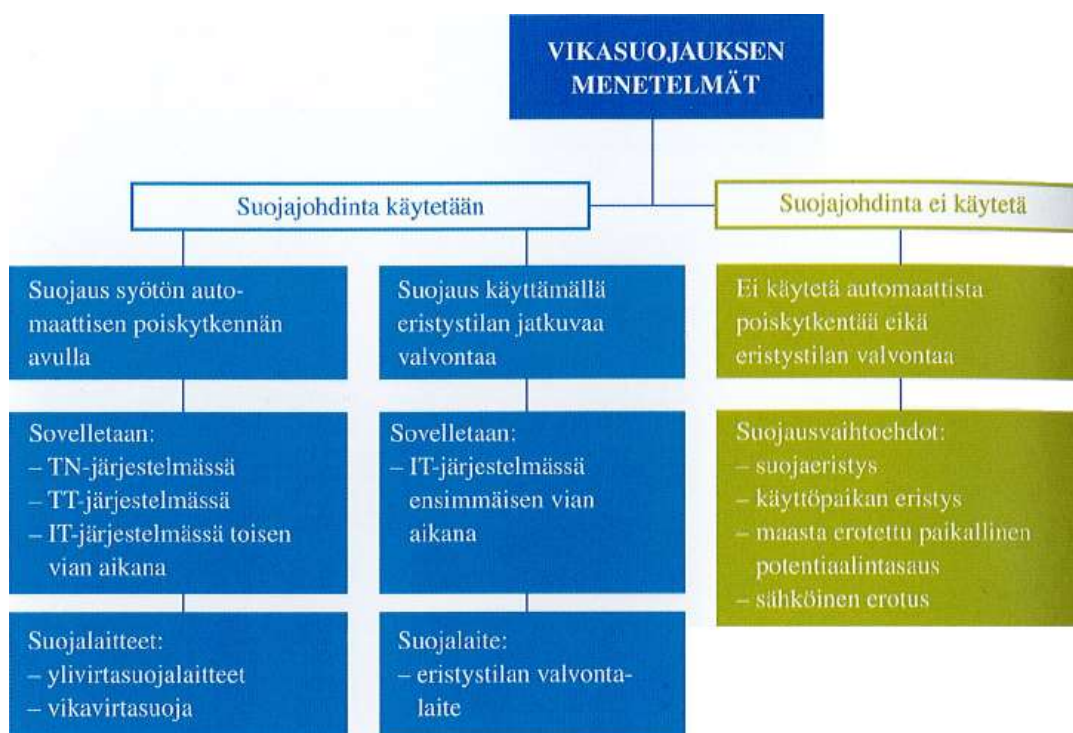
Kun tarkastellaan standardia SFS-EN 60947-4-1, joka koskee pienjännitealueen kontaktoreita sekä moottorinkäynnistimiä, sisältää se kaksi eri poikkeusta. Ensimmäinen

poikkeus sallii ylikuormitussuojan tai kontaktorin vaurioitumisen oikosulkutilanteessa, jolloin suojalaitteen vaurioitumisesta on saatava indikaatio eikä moottorin sallita uudelleen käytettävän ennen suojalaitteen korjaamista. Toisessa poikkeuksessa sanotaan, että suojalaitteiden on oltava oikosulkutilanteessa käyttökelpoisia uudelleen. Kummassakaan tapahtumassa ei sallita henkilöille tai asennuksille aiheutuvan vaaraa tai vahinkoa. (5, s.150–153.)

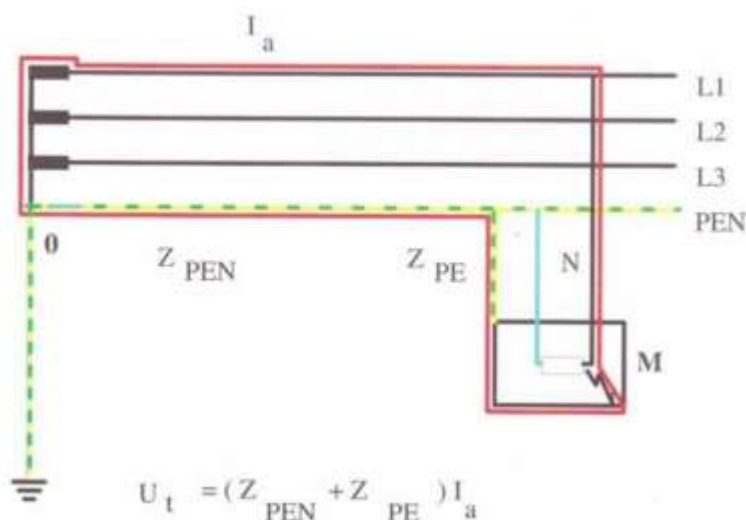
3.3.5 Vikasuojaus

Vikasuojauksella suojataan ihmisiä sekä kotieläimiä koskettamasta vian aiheuttamia jännitteiksi tulleita sähköä johtavia osia niin, ettei niistä aiheudu näille vaaraa. Tavat, joilla vikasuojaus voidaan toteuttaa, on luokiteltu D1-2017: Käsikirja rakennusten sähköasennuksista (5) taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Vikasuojaus menetelmät (5, s.84).



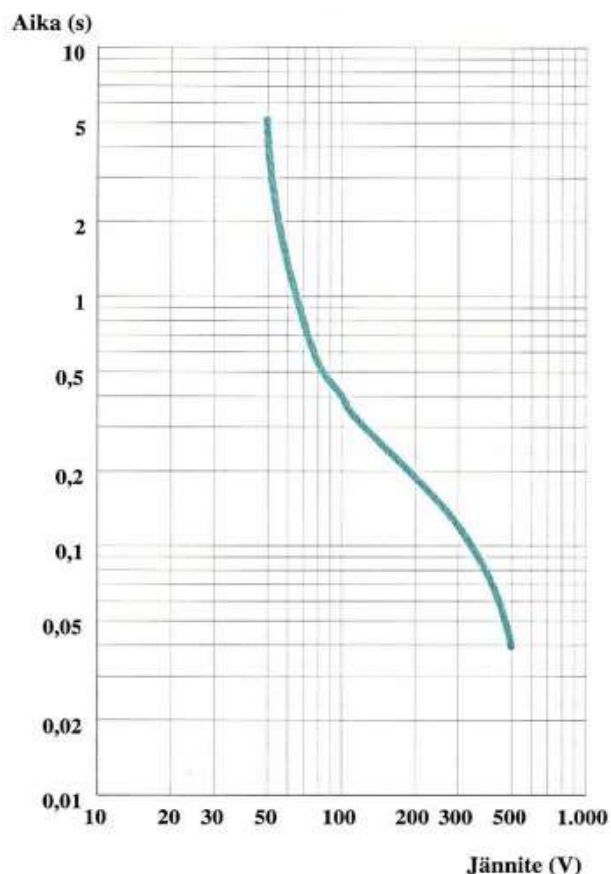
Insinööriyössä käsiteltävässä kohteessa, pienjänniteverkossa on käytössä TN-S-järjestelmä. TN-S-järjestelmässä vikavirtapiirin muodostaa vianalainen vaihejohdin ja suojajohdin, joka on yhdistettynä suoraan jännitelähteen keskipisteeseen.



Kuva 10. TN-S-järjestelmän vikavirtapiiri (5, s.86).

Kuvassa 10 on havainnoitu TN-S-järjestelmän vikavirtapiiri. Kuvassa esiintyvä lausekkeen avulla voidaan määritellä syntyvä kosketusjännite U_t suojajohtinten Z_{PE} ja Z_{PEN} summa kerrottuna vaihejohtimen ja jännitteelle alttiin osan, M, syntyvällä vikavirralla I_a .

Yleisimmin sähköasennuksissa käytetään syötön automaattista poiskytkentää vikasuojauksen menetelmänä. Jotta suojaus toteutuu, täytyy vikavirtapiiri sekä sopiva suojalaitte olla suunniteltu. Menetelmä perustuu siihen, että ihmistä tai eläintä estetään joutumasta kosketuksiin vian aiheuttaneesta, jännitteiseksi tulleesta osasta niin pitkäksi aikaa, että siitä koituisi vaurioita. Jotta vikasuojaus syötön automaattisella poiskytkennällä toteutettu suojausmenetelmä toimisi kunnolla, on sille asetettu kaksi ehtoa. Virtapiirissä täytyy olla yhteys eli suunniteltu vikavirtapiiri, jota pitkin vikavirta voi kulkea. Tämä ehto vaatii sitä, että kaikki asennuksesta syötetyiden laitteiden jännitteelle alttiit osat tullaan liittämään suojajohtimin maadoitusjärjestelmään siten, että vikavirtapiiri toteutuu. Tämän lisäksi on asetettu myös toinen ehto, joka koskee suojalaitetta. Suojalaitteeksi on asetettava tarkoitukseen sopiva laite, jolla vikavirta sekä kosketusjännite voidaan kytkeä pois. Poiskytkentäaika puolestaan määrittyy kosketusjännitteestä, vian todennäköisyydestä ja todennäköisyydestä, jolla henkilö koskee laitteeseen vian aikana.



Kuva 11. Kosketusjännitteen ja sallitun vaikutusajan riippuvuus (5, s.85).

Kuvassa 11 esitettyä kosketusjännitteen suhdetta sille sallittuun vaikutusaikaan ei kuitenkaan käytetä suoraan määriteltäessä syötön automaattisen poiskytkennän aikaa, vaan käyrältä on valittu ne poiskytkentäajat, joilla voidaan kattaa kaikki mahdolliset vika-tilanteet.

3.4 Jännitteen alenema

Suurissa kiinteistöissä ja teollisuuslaitoksissa välimatkat voivat olla pitkiä, jolloin se vaatii myös huomiota siihen, etteivät ne aiheuta kaapeleissa jännitteen alenemia. SFS 6000 -standardin taulukkoon G52.1 (5, s.282) on kirjoitettu suosituksia jännitteenalenemiin liittyen. Koska kyseessä on suosituksia, ellei toisin ole sovittu, ne eivät ole velvoittavia.

Pienjännitealueilla olevia asennuksia, joita syötetään yleisestä jakeluverkosta, suositellaan aleneman olevan valaistuksen osalta 3 % ja muiden käyttöjen osalta 5 %. Mikäli

pienjänniteasennuksia syötettäisiin yksityisestä tehonlähteestä, suositellaan alenemien olevan valaistuksen osalta 6 % ja muiden käyttöjen osalta 8 %. Suurempi jännitteenalennema on hetkellisesti sallittu tilanteissa, joissa esimerkiksi moottori käynnistetään. Näiden lisäksi on myös edellä mainitussa standardissa sanottu, kun asennuksen pääjohtojen pituudet ylittävät 100 metriä, niin jännitteenalenemia voidaan kasvattaa 0,005 % kaapelin 100 metrin ylittävän pituuden metriä kohden. Mikäli tätä lisäystä ei ole, se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.

Mikäli halutaan laskea jännitteenalenemia, ne voidaan laskea kaavojen 3-6 mukaisesti erilaisissa piireissä sekä tapauksissa. (5, s.242; 6, s.233, s.282)

Tasajännitepiirissä:

$$\Delta U = I^2 \cdot r \cdot L \quad (3)$$

Yksivaiheisessa vaihtojännitepiirissä:

$$\Delta U = I^2 \cdot L \cdot (r \cdot \cos \varphi \pm x \cdot \sin \varphi) \quad (4)$$

Kolmivaiheisessa vaihtojännitepiirissä:

$$\Delta U = I^2 \cdot L \cdot \sqrt{3} \cdot (r \cdot \cos \varphi \pm x \cdot \sin \varphi) \quad (5)$$

Mikäli kuorma on induktiivista, käytetään kaavoissa plusmerkkiä. Kun taas kyseessä on kapasitiivisesta kuormasta, kaavaan valitaan miinusmerkki.

Suhteellinen jännitteenalennema:

$$\Delta u = (\Delta U / U_n) \cdot 100 \% \quad (6)$$

Kaavoissa 3-6, joissa

ΔU on jännitteenalenema volteissa (V)
 I on kuormitusvirta (A)
 L on johdon pituus (m)
 r on ominaisresistanssi (Ω/m)
 x on ominaisresistanssi (Ω/m)
 U_n on nimellisjännite
 ϕ on jännitteen ja virran välinen vaihekulma
 Δu on suhteellinen jännitteenalenema.

3.5 Oikosulkuvirrat

3.5.1 Oikosulkuvirta sähköverkossa

Varsinkin teollisuusverkoissa oikosulkuvirtojen hallinta on tärkeää. Se voi syntyä maan ja vaiheen välille tai kahden vaiheen välille. Mikäli se syntyy kolmen vaiheen välille, puhutaan siinä tapauksessa symmetrisestä oikosulusta. Jo läpi käytyjen, teollisuusverkoille ominaisten piirteiden, kuten lyhyiden etäisyyksien, suurien koneiden, muuntamoiden sekä mahdollisesti oman sähköntuotannon takia käsiteltävät oikosulkuvirrat ovat suuria. Jotta toiminta teollisuusverkkojen parissa olisi turvallista ja säästyttäisiin vaurioilta, tulisi oikosulkuvirtojen olla mahdollisimman pieniä. Kuitenkin suurilla oikosulkuvirroilla ovat omat hyvät puolensa. Suuret oikosulkuvirrat kertovat verkon pienestä impedanssista sekä verkon sisältämä suojaus havahtuu oikosulun hetkellä nopeasti.

Jotta verkko saadaan rakennettua riittävän kestäväksi, on tiedettävä oikosulkuvirtojen koko eri kohdissa verkkoa, koska kaikkien verkon sisältämän komponenttien tulee kestää oikosulkuvirran aiheuttamat termiset, sähködynaamiset sekä mekaaniset rasitukset. Tämän lisäksi suojausta ja mitoitusta suunnitellessa on oltava tiedossa oikosulkuvirtojen suuruus.

Oikosulkuja tapahtuu mahdollisesti kaapeleiden tai johtimien eristeen vanhenemisen ja haurastumisen vuoksi sekä myös ajoittain vaadittavien korjaus- ja huoltotoimien ohessa paikalleen unohdettujen maadoitusten takia. Havaittuja oikosulkujen aiheuttajia ovat myös eristysvälin yli lyömä ylijännitteestä aiheutunut valokaari tai yksinkertaisesti mekaaninen vaurio kaapelissa. Suurioikosulkuvirtaisilla tapauksilla voi olla tuhoisat seuraukset oikeaan paikkaan ilmenneenä. Siitä voi aiheutua tulipaloja, jotka tuhoavat

kokonaisuudessaan mahdollisesti kriittisen osan sähkönjakeluverkosta, josta koituu verkon loppukäyttäjille sähkökatkoksia. (8, s.1.)

3.5.2 Oikosulkuvirran laskenta

Kolmivaiheisen sähköverkon likiarvoista kolmivaiheista oikosulkuvirtaa laskiessa suositetaan ominaisoikosulkutehoon pohjautuvaa tapaa sen helppouden vuoksi. Ominaisoikosulkuteholla tarkoitetaan sitä oikosulusta syntyvää tehoa, joka ilmenee kyseisen komponentin jälkeen, jos muut virtapiirin komponentit sekä osat eivät rajoittaisi sitä. Käsite oikosulkuteho on laskennallinen, eli se sisältää täyden oikosulkuvirran sekä -jännitteen. Tapa soveltuu hyvin säteittäisverkkojen oikosulkutehojen laskentaan käsin sekä oikosulkuvirtojen suuruusluokan arvioimiseen. (8,, s.8–10; 9.)

Generaattorin sekä muuntajan oikosulkuteho voidaan laskea kaavoilla 7 ja 8:

$$S_{kp} = U_n^2 / Z_k \quad (7)$$

$$S_{kp} = S_n / z_k \text{ (tai } z_d) \quad (8)$$

Tämän jälkeen oikosulkuvirta voidaan laskea ominaisoikosulkutehosta kaavalla 9:

$$I_k = (c * S_k) / (\sqrt{3} * U_n) \quad (9)$$

Kaavoissa 7-9,

S_{kp} on ominaisoikosulkuteho
 U_n on laskettavan komponentin nimellispääjännite
 Z_k on laskettavan komponentin oikosulkuimpedanssi ohmeina vaihetta kohti,
 S_n on laskettavan komponentin nimellisteho
 z_n on oikosulkuimpedanssin suhteellinen arvo,
 (generaattorilla tahtireaktanssin z_d suhteellinen lukuarvo)
 c on kerroin, joka määrittelee lasketaanko max vai min arvoja

Kun vaaditaan tarkempia laskutoimituksia niin, että myös vaihekulmat saadaan selville, tulee käyttää Theveninin menetelmää. Tämä laskumenetelmä toimii hyvin, kun lasketaan teollisuusverkkojen oikosulkuvirtoja, koska teollisuuden sähköverkoissa muodostuu

ongelmakohtaan monen eri oikosulkulähteen syöttämän oikosulkuvirran summa. Theveninin määritelmässä kaikkien oikosulkulähteiden sähkömotoriset voimat voidaan korvata yhdellä voimalla, mikä sijoitetaan ongelma-kohtaan.

Alkuoikosulkuvirta I_k'' on ensimmäinen arvo, joka tulee laskea, kun verkkoa sekä siihen kuuluvia osia ryhdytään mitoittamaan. Tätä arvoa käytetään myös mitoituksen ja laskennan edetessä. (8, s.8–10; 9, s.1–3.)

Yksivaiheisen sijaiskytkennän oikosulkuvirta saadaan käyttämällä kaavaa 10:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (10)$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k1}'' saadaan käyttämällä kaavaa 11:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{z_1 + z_2 + z_0} \quad (11)$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2}'' saadaan käyttämällä kaavaa 12:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{z_1 + z_2} \quad (12)$$

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_{k3}'' saadaan käyttämällä kaavaa 13:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot z_1} \quad (13)$$

Kaavoissa 10-13,

c on jännitekerroin
 U_n on nimellisjännite
 z_k on oikosulkupiirissä esiintyvä impedanssi
 z_0 on oikosulkupiirissä esiintyvä nollaimpedanssi
 z_1 on oikosulkupiirissä esiintyvä myötäimpedanssi
 z_2 on oikosulkupiirissä esiintyvä vastaimpedanssi
 R_k on oikosulkuresistanssi
 X_k on oikosulkureaktanssi.

Mikäli oikosulku on kolmivaiheinen eli symmetrinen, se sisältää ainoastaan myötäimpedansseja, kun taas puolestaan epäsymmetrisiä oikosulkuvirtoja laskiessa, joudutaan kaavoihin sijoittamaan vasta- sekä nollaimpedansseja. Kaavoissa on myös muuttuja c , joka on standardin IEC 60909 sisältämä taulukko 3, sisältäen jännitteelle kertoimen riippuen siitä, lasketaanko oikosulun pienintä vai suurinta arvoa. (8, s.8–10; 9, s.1–3.)

Taulukko 3. IEC 60909 -standardin määrittelemät c -kertoimet. (10, s.22).

Nominal system voltage U_n	Voltage factor c for the calculation of	
	maximum short-circuit currents c_{max}^a	minimum short-circuit currents c_{min}
Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038:2009, Table 1)	1,05 ^c 1,10 ^d	0,95 ^c 0,90 ^d
High voltage ^b >1 kV to 230 kV (IEC 60038:2009, Tables 3, 4)	1,10	1,00
High voltage ^{b, e} > 230 kV (IEC 60038:2009, Table 5)	1,10	1,00

^a $c_{max} U_n$ should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems.
^b If no nominal system voltage is defined $c_{max} U_n = U_m$ or $c_{min} U_n = 0,90 \cdot U_m$ should be applied.
^c For low-voltage systems with a tolerance of $\pm 6\%$, for example systems renamed from 380 V to 400 V.
^d For low-voltage systems with a tolerance of $\pm 10\%$.
^e For nominal system voltages related to $U_m > 420$ kV, the voltage factors c are not defined in this standard.

4 Verkostolaskennan lähtökohdat

4.1 Verkostolaskentaohjelma

Insinööriyössä käsiteltävän kohteen pienjänniteverkon laskenta ja mallintaminen toteutetaan Neplan-ohjelmalla. Ohjelmisto muodostuu moduuleista, joka soveltuu sähkö-, vesi-, kaasu-, sekä lämmitysverkostoiden laskentaan. Neplan on kansainvälisesti käytetty ja suosittu ohjelma, joka tunnettiin aiemmin nimellä Calpos, ja se on nykyisin käytössä jo yli 110 maassa. Ohjelma voidaan ostaa kokonaan valmiina pakettiohjelmana sekä sitä voidaan laajentaa yrityksen vaatimusten mukaisilla lisämoduuleilla, jotka tuovat tullessaan eri mahdollisuuksia laskentaan ja mallintamiseen.

Neplan-ohjelmiston takana on yritys nimeltään NEPLAN AG. Yritys on perustettu vuonna 1988, sen päätoimipaikka on Sveitsin Küsnachtissa, lähellä Zürichiä. Se on yksityisomisteinen ja täysin itsenäinen kokonaisuus, mutta se on kuitenkin osa kansainvälistä Neplan-Consulting Groupia.

Käyttämäni Neplan-ohjelmiston versio 5.5.8 on ”Industrial” -paketilla varustettu ja sisältää 50 laskentasuorinta. Ohjelmistoa on laajennettu suojausasettelu-, tehonjako-, moottoreidenkäynnistyslaskenta-, selektiivisyys-, kaapeleidenmitoitus- sekä oikosulkuvirtamoduulilla. Ohjelma sisältää myös manuaalit jokaista toimintoa varten sekä kirjastoja kaapeleista ja suojalaitteista, jotka eivät kuitenkaan täysin nimeltään vastaa Suomessa käytettäviä kaapeleita.

4.2 Teollisuuskiinteistön tiedot

Opinnäytetyössä käsitellään Suomeen rakennettavaa elintarvikealan teollisuuskiinteistöä. Rakennus liitetään paikallisen jakeluverkonhaltijan keskijännitejakeluverkkoon kiinteistöön rakennettavan muuntamon kautta. Rakennuksen kokonaisala kylmävarastointeen on noin 9000 m². Tämä mittava kiinteistö toteutetaan nykypäivänä suositulla menetelmällä eli mineraalivillaelementeillä.

Kiinteistö liitetään kj-liittymänä paikallisen sähköjakeluyhtiön 20 kV:n verkkoon, joka on ilmoittanut kolmivaiheisen oikosulkuvirran liittymispisteessä olevan 7400 A.

Muuntamotila

Kohteeseen toteutetaan kiinteistön oma kuluttajamuutamo, jonka liittymisteho kj-verkkoon on 3200 kVA. Kiinteistö liitetään paikallisen sähköjakeluyhtiön 20 kV kj-jakeluverkkoon kahdella liittymäkaapelilla. Liittymisjohdot asennetaan sähköjakeluyhtiön toimesta kj-kojeistolle saakka. Muuntamotilaan sijoitetaan keskijännitekojeisto, kaksi 1600 kVA:n kuivamuuntajaa sekä sähköenergian ostomittaus.

Muuntajat 20 kV/0,4 kV

Muuntajat ovat itsessään urakkaan kuuluvia sähkölaitteita, joilla muunnetaan jännitetaso kj-jakeluverkosta pienjännitetasoon. Kiinteistöön sijoitettavat kaksi muuntajaa ovat valuhartsieristeisiä kolmivaiheisia jakelumuuntajia, joille on suunnitteluvaiheessa asetettu seuraavat vaatimukset:

Ensiöjännite:	20 000 V
Toisiojännite:	400 V / 230 V
Teho:	1600 kVA
Taajuus:	50 Hz
KytKentä:	Dyn11
Oikosulkureaktanssi:	6 %
Paloluokka:	F1

Kj-kojeisto

Nykyisin kj-kojeistot valmistetaan metallikuorisiksi sekä ulkoisen kotelointiluokan tulee vähintään olla IP3X. Kun kojeistoa mitoitetään, sen valokaarikestoisuus on yksi tärkeimmistä perusteista. Vian sattuessa valokaaren aiheuttama paine kojeistossa on saatava purettua hallitusti. Purkaussuunnat paineelle ovat useimmiten ylös ja sitä kautta ulos.

Muuntamotilaan asennettava kj-kojeisto hankitaan SF6-eristeinen kj-kojeistona. Kojeston sisältämät kytkinlaitteet varustetaan tarvittavilla apukoskettimilla, jotta valvonta- ja hälytystoiminnot voidaan toteuttaa. Kohteen kojeistolta vaaditaan myöskin kaapelilähtöjen sisältävän liitännät 630 A:n kulmapistokkeille sekä muuntajalähdöissä 200 A:n kulmapistokkeille.

Keskukset

Kohteen normaalia sähkönjakelua palvelevat kaksi pääkeskusta, kummallekin muuntajalle sekä ryhmäkeskukset pääkeskusten jälkeen. Pääkeskusten välille asennetaan kiskokatkaisija, joka mahdollistaa tilapäisesti pääkeskusten syöttämisen yhdellä muuntajalla esimerkiksi muuntajan huollon tai korjauksen ajaksi.

Sähkönjakelu itsessään suunnitellaan pääkeskuksilta eteenpäin niin, että prosessilaitteiden, LVI- ja kylmälaitteiden ja muiden kulutuskojeiden, kuten pistorasioiden ja valaistuksen jakelu ovat toisistaan erillisiä jakeluverkkoja.

Kaapelit

Kohteessa käytetään TN-S-järjestelmää, joten kaapeleiden tulee soveltua tähän. Kaapeleiden johdinmateriaalina käytetään 16 mm²:iin asti kuparia, jonka jälkeen suurempien kaapelikokojen johdinmateriaaleiksi pyritään suosimaan alumiinia. Kaapeleiden koot määritellään sähkösuunnitelmissa niiltä vaaditun kuormituksen perusteella.

Keskijännitekaapelit toimitetaan tarvikkeineen sekä asennetaan täyteen käyttökuntoonsa. Kojeiston ja muuntajien väliset yhteydet toteutetaan asennuskanaaliin asennettavilla, piirustusten mukaisilla 20 kV:n kaapeleilla. Päättinä käytetään muuntaja-, kojeisto-, ja kaapelivalmistajien suositusten mukaisia ja hyväksytyjä kaapeleita. Muuntamotilan kaapeliläpiviennit suljetaan ulkoseinäläpivientien osalta vesitiiviisti ja muiden seinien osalta hyväksyttävillä palokatkoilla.

Kiinteistön sisältämä kulutuslaitteisto

Koska kiinteistössä harjoitetaan elintarviketeollisuuteen perustuvaa toimintaa ja kiinteistö on kooltaan iso, voidaan myös olettaa sen sisältävän runsaasti sähköenergiaa kuluttavia laitteistoja. Jo kohteen lähtötiedoissa toimitetaan sähkösuunnittelijalle mahdolliset laiteluettelot, jotka vaikuttavat suurelta osaltaan verkon laskentaan. Kohteesta tehdään sähkösuunnittelun alkuvaiheessa teholaskelmat, joissa otetaan kaikki tehoa kuluttavat laitteet.

Elintarvikkeiden jalostuksen ja tuotannon vuoksi, kylmä- sekä prosessilaitteet kuormittavat kiinteistön sähköverkkoa kaikista eniten. Saatujen lähtötietojen perusteella prosessilaitteiden vaatima sähköteho on reilusti yli 800 kW ja kylmäkoneiden yli 750 kW. Kiinteistön koon vuoksi myös LVI-laitteet ovat tehoiltaan suuria, noin 300 kW.

Kohteeseen asennetaan sähköautoille 10 latauspaikkaa, joiden tehot paikkaa kohden ovat 22 kW, ja näiden lisäksi asennetaan noin 60 autolämmityspaikkaa. Muita kuormia ovat esimerkiksi ulkovalaistus, joka suunnitellaan kohteen alkuvaiheessa

asemapiirustuksen perusteella. Sisätilan valaistus on suositeltavaa laskea suunnittelun alkuvaiheessa tilakohtaisesti sähköteho tilan pinta-alaa kohden. Näihin tiloihin on myös otettava huomioon muita kuormia, kuten esimerkiksi pistokeliitännän omaavat laitteet tai toimistoissa sijaitsevat tietokoneet.

Kaiken kaikkiaan kohteen vaatimaksi sähkötehoksi on laskettu noin 2500 kW. Tätä voidaan kutsua lähtötietojen perusteella kohteen huipputehoksi, mutta on myös huomiotava, etteivät nämä kaikki sähköverkkoa kuormitettavat laitteet ole samanaikaisesti päällä, vaan huipputehosta voidaan laskea todellisuutta lähempänä oleva kuorma ker-toimella, joka voidaan miettiä kohdekohtaisesti.

5 Verkon laskenta

5.1 Suunnittelun merkitys verkon laskennassa

Vuonna 2017 päivittyneissä standardeissa, kuten SFS 6000 ja D1-käsikirja rakennusten sähköasennuksista, on lisätty vaatimuksia koskien sähköasennusten suunnittelua verrattuna edellisiin kirjojen painoksiin. Standardin SFS 6000 kappale suunnittelusta korostaa kuinka suunnitteluvaiheessa täytyy laskelmien tai muilla tavoilla varmistaa, että sähköasennuksien ja niitä koskevien suojausten perusvaatimukset ovat riittäviä. Varmistaminen laskelmin on perusteltua, koska väärin mitoitettujen suojalaitteiden korjaaminen sekä uusiminen tulisivat olemaan työläämpää verrattuna suunnitteluvaiheessa tehtäviin laskelmiin.

Suojauksen perusvaatimuksella tarkoitetaan lähtökohtaisesti sekä ylivirtasuojauksen, sisältäen ylikuormitus- ja oikosulkusuojaukset, että vikasuojauksen toteutumiset. Standardi ottaa kantaa myöskin jännitteenalenemiin sekä suojauksen selektiivisyyksien tarkasteluun, mutta ei aseta niille ehdottomia vaatimuksia. Sähköasennusten tarvitessa ylijännitesuojauksia, täytyy niiden toteutustapa määritellä suunnitteluvaiheen aikana. Jotta voidaan selvittää suojausvaatimukset, on suunnitteluvaiheessa saatava riittävän kattavat lähtötiedot. Vikasuojauksen toiminnan tarkastaminen vaatii tiedon pienimmästä maasulkuvirrasta, joka on vaiheen ja PE- tai PEN-johtimen välillä, liittymäkohdassa. Liittymäkohdassa suurinta esiintyvää oikosulkuvirtaa tarvitaan, kun suunnitellaan oikosulkusuojauksia.

Kun tiedetään mahdolliset kuormat, voidaan niiden perusteella toteuttaa kaapeleiden mitoittaminen sekä ylikuormitussuojaus. Poikkipinta-ala kaapelille tai johtimelle valitaan lähtökohtaisesti sen kuormitusvirran perusteella. Suunnittelun aikana mahdolliset kuormitusvirrat määritellään keskustasolla sekä tarvittaessa ryhmäjohtotasolla, kuten esimerkiksi moottorilähdöissä. Tämän jälkeen kaapelin kuormitettavuudelle valitaan kuormitus-kertoimet vallitsevien olosuhteiden sekä kaapelin asennustavan sekä -reitin mukaan, jotta saadaan tarkempi mitoitus.

Oikosulkusuojauksen on toteuduttava jokaisessa johdinten välisessä tai missä tahansa kohtaa johtoa tapahtuvassa viassa. Jotta voidaan varmistaa oikosulkusuojauksen toimivuus, on tiedettävä suurimmat oikosulkuvirrat keskuksissa. Tämän lisäksi voidaan myös tarvittaessa selvittää ryhmäjohtoon päässä oleva pienin oikosulkuvirta. Mikäli oikosulkusuojaus toteutetaan yhteisellä ylikuormitus- ja oikosulkusuojalla, on varmistettava, että ylikuormitussuojaus toteutuu sekä suojalaitteen katkaisukyky on riittävä. Mikäli käytetään erillistä oikosulkusuojausta, käytetään valmiiksi laskettuja taulukoita tai laskentakaavoja riittävyyden toteamiseksi.

Kun vikasuojauksen toimintaa tarkastellaan, tarvitaan lähtötiedoiksi pienimmät vikavirrat keskuksissa sekä suurimmat sallitut ryhmäjohtojen pituudet. Vaihtoehtoisena tietoina voidaan määrittää myös pienin oikosulkuvirta ryhmäjohtoon päässä. Laskemalla saatujen oikosulkuvirtojen tulee olla riittävän suuret, jotta vikasuojauksen nopea poiskytkentä toteutuu.

SFS 6000-standardi ei aseta vaatimusta jännitteenaleneman tai selektiivisyyden selvittämisestä, vaan mikäli niistä on sovittu erikseen. Yksinkertaiset sekä suppeat asennukset sekä niiden suojausvaatimusten toteutumisten varmistaminen voidaan suorittaa hyvin myös laskemalla käsin, mutta suurempien kokonaisuuksien sekä laitteistojen kohdalla voidaan käyttää sähköverkon mitoittukseen tarkoitettuja ohjelmia. (5, s. 34–35.)

5.2 Laskennan suorittaminen Neplan-ohjelmalla

Verkon laskenta aloitetaan siinä kohtaa sähkösuunnittelua, kun kohteessa on selvillä sähkötehoa kuluttavien laitteiden määrät ja sijainnit sekä niitä palvelevat keskuskeskukset. Keskuksille lasketaan sen palvelemista laitteista tehot yhteen, jotta tiedetään, kuinka paljon kuormaa keskuksella on ja voidaan määrittää kooltaan sekä arvoiltaan riittävä keskus. Kyseessä olevassa kohteessa on laskettu keskuksiin noin 30 prosentin varaus mahdollisille uusille laitteille. Kun tiedetään keskuksen lopullinen koko, voidaan valita sille sopiva syöttökaapeli, ottaen huomioon sen mahdollinen reitti, joka vaikuttaa puolestaan kaapelin kuormitettavuuteen.

Kohteen pienjänniteverkon laskentaan ja mallintamiseen käytettiin pohjana sähkösuunnittelun aikana tehtyä nousujohtokaaviota. Kuten nousujohtokaavio, myös Neplan-ohjelmistossa tuotettava verkon malli on kaaviomainen ja pyritään piirtämään siten, että se vastaa maantieteellisesti todellisuutta. Verkon laskenta aloitetaan lisäämällä kohdetta syöttävän jakeluverkko ja sen parametrit. Jakeluverkon tiedot saatiin kyseessä olevan kaupungin paikalliselta jakeluverkon haltijalta, joiden antamilla tiedoilla verkkoa simuloitiin.

Jakeluverkon parametroidin jälkeen lisättiin kiinteistöön rakennettavan kuluttajamuuntamon sisältämät jakelumuuntajat. Muuntajilta vaadittavat arvot, kuten tehot sekä kytkentä, määriteltiin sähköselostuksessa, jonka Hepacon Oy on kohteeseen laatinut. Koska kohteeseen ei ole tyypitettynä tiettyä, valittiin jokin muuntajatyyppe, joka asettuu kaikkiin suunnittelutoimiston asettamiin kriteereihin.

Kiinteistöä syöttävän verkon sekä muuntajien ollessa aseteltuna asetellaan kohteeseen suunnitellut keskuskeskukset. Keskukset esitetään kaaviossa kiskomaisena elementtinä, nimitetään sähkösuunnittelun aikana päätetyillä keskustunnuksilla. Koska keskuksien palvelemien kulutuslaitteiden tehot ovat suunnittelun aikana merkitty nousujohtokaavioon, esitetään ne Neplan -ohjelmassa yksinkertaisena kuormaelementtinä ja asetellaan elementille tehoarvo.

Keskusten ollessa sijoiteltuna yhdistetään ne nousujohtokaavion mukaisesti nousujohtojen toisiinsa. Neplan-ohjelmistoon on saatavilla valmiita kaapelikirjastoja, mutta ne eivät suoranaisesti vastaa Suomessa käytettävien kaapeleiden nimiä eikä kokoja, joten

niitä voidaan tehdä myös manuaalisesti ja luoda niistä oma kirjastonsa. Kaapelin luomisessa tarvitaan johdinmateriaalien resistanssin sekä reaktanssin arvot kilometriä kohden, jotta kaapelia piirrettäessä kaavioon ohjelma laskee kaapelin kokonaisvastuksen, kun sen pituus on merkitty. Kaapelia piirrettäessä asetetaan arvot sen pituudesta sekä mikäli nousujohto toteutetaan useammalla kaapelilla suuremmilla tehoilla, merkitään myöskin rinnakkaisten kaapeleiden lukumäärä parametreihin.

Nousujohdot vaativat myöskin suojalaitteet. Kaapelin alkupäähän lisätään sulake elementtinä. Sulakkeista on ohjelmaan saatavilla laaja kirjasto eri tyyppin sulakkeita sekä suojalaitteita eikä niitä tarvitse näin ollen itse manuaalisesti luoda. Asetettavien sulakkeiden arvot on poimittu suunnittelun aikana tehdyistä keskustusten pääkaavioista, joihin nousukaapelit ovat merkitty lähteväksi.

Kun laskettava verkko on luotu, lasketaan verkko "Load flow"-tehonjakolaskennalla. Tämä laskentatapa antaa verkolle perusarvot, joihin nousukaapelit sekä niille merkityt arvot, syöttävän verkon arvot sekä esitetyt kuormat vaikuttavat. Laskenta antaa muun muassa jännitteenalenemat keskuksilla, joille voidaan valikoista määrittää raja-arvot, jotka ylitettäessä ohjelma ilmoittaa jännitteenaleneman olevan liian suuri. "Load flow"-laskenta antaa myös nousukaapeleille, merkattujen kuormitusten perusteella, prosentuaalisen arvion kaapelin kuormituksesta. Laskennan avulla nähdään, onko pienjänniteverkkoon suunnitellut kaapeloinnit poikkipinta-alaltaan tarpeeksi suuria, kun otetaan mahdollinen verkon laajentaminen tai nousukaapelin pituus huomioon. Tehonjakolaskennan tulokset ovat esitettynä liitteessä 1.

"Short circuit"-oikosulkulaskennalla voidaan demonstroida vikatilanne valitussa verkon osassa ja vian tyyppi voidaan valita laskennan asetuksista. Vuonna 2017 uudistuneessa SFS 6000-standardissa mainitaan, että oikosulkuvirroista tulee selvittää sen suurin ja pienin arvo, jolla useimmiten viitataan pienjänniteverkkoa käsiteltäessä kolmivaiheoikosulkuun ja yksivaiheoikosulkuun. Laskennalla saadaan myös nousukaapeleita suojaavien suojalaitteiden toiminta-ajat valitussa vikatilanteessa. Laskennalle määriteltävät parametrit sisältävät esimerkiksi vikatyypin valinnan sekä c-arvo, joka määrittelee, onko kyseessä oikosulun pienin vai suurin arvo. Mikäli kolmivaiheista oikosulkuvirtaa lasketaan, on parametreista valittava kohta "Ik max calculation". Neplan-ohjelmalla lasketut kolmivaiheiset oikosulkuvirrat ovat esitettynä liitteessä 2 ja yksivaiheiset oikosulkuvirrat liitteessä 3.

Neplan-ohjelmalla on myös mahdollista tarkastaa peräkkäisten suojalaitteiden selektiivisyys. Suojalaitteiden selektiivisyys on mahdollista selvittää, kun vikatilanne asetetaan esimerkiksi viimeiseen kolmesta peräkkäisestä keskuksesta. Tehonjako- ja oikosulkulaskentojen suorittamisen jälkeen, valitaan ohjelman "Analysis"-valikosta "Overcurrent Analysis"-valikon alta "Chart last calculation", jolloin ohjelma muodostaa taulukkomuotoisesti esitettynä vikaantuneen keskuksen edellä toimivat peräkkäiset suojalaitteet. Taulukko on esitettynä liitteessä 4. Vertailuun valittu otanta simuloidusta pienjänniteverkosta sisältää tyypiltään samanlaisia varokkeita, joten käyrät ovat muodoiltaan samanlaisia, eivätkä ne näin ollen sisällä päällekkäisyyksiä sulakkeiden ollessa eriarvoisia nimellisvirroiltaan.

5.3 Käsin laskennalla tuotetut vertailuarvot

Tässä työssä laskettiin käsin yksi nousuhaara vertailuarvoksi Neplan-ohjelman tuottamille arvoille. Nousuhaara koostui kiinteistön toiselta pääkeskukselta, PK 2, ryhmäkeskukselle RK 1105-V, johon kytketään nousujohto toiselle ryhmäkeskukselle RK 1106-V. Kohteen liittymän lähtötiedoista poimittiin jakeluverkkoyhtiön ilmoittama kolmivaiheinen oikosulkuvirta, I_{k3}'' , kj-puolella, jonka avulla laskettiin jakeluverkon impedanssi.

Jotta oikosulkuvirrat saatiin valitulle nousuhaaralle laskettua käsin, redusoitiin jakeluverkon impedanssi 400 V:n jänniteporrasta vastaavaksi sekä laskettiin muuntajan kilpiarvojen avulla sen impedanssi. Näiden impedanssien avulla laskettiin pääkeskukselle kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Koska kyseessä on kolmivaiheinen oikosulku, on vika symmetrinen eli nousukaapelin vaikutusta oikosulkuvirtoja laskiessa otettiin huomioon ainoastaan kaapelin impedanssin myötäkomponentti.

Pienimmän eli yksivaiheisen oikosulkuvirran laskenta poikkeaa kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskemisesta siten, että nousujohtoon muodostama impedanssiarvo muuttuu virtapiiriin muodostuessa vaihe- ja PE-johtimesta. Tässä oikosulkutapauksessa tulee ottaa kaapelin impedanssin myötä-, vasta-, ja nollakomponentti huomioon. Koska oikosulku tapahtuu kaukana generaattoreista, voidaan myötä- sekä vastakomponenttia pitää yhtä suurina.

Työn aikana laskettiin manuaalisesti myös jännitteenalenemat, jotta myös näitä arvoja oli mahdollisuus vertailla ohjelman antamiin tuloksiin. Jännitteenalenemaan vaikuttaa kaapelin vastusarvot, jännitteen ja virran välinen vaiheensiirtokulma sekä kaapelissa kulkeva virta, joka tämän työn aikana kaapeleille laskettiin niille merkattujen kuormitusten perusteella. Mikäli laskennan aikana huomattaisiin jännitteenalenemien nousevan yli SFS 6000-standardin antamien ohjeellisten raja-arvojen, tulisi harkita nousukaapelin koon suurentamista. Poikkipinta-alaltaan suurempaan nousukaapeliin vaihtaminen pienentää jännitteenalenemaa, koska kaapelin vastusarvo laskee. Koska kyseessä on valaistusta palvelevat ryhmäkeskukset, niin ohjeellisena raja-arvona voitiin pitää 3 %:n alenemaa. Kulutusmuuntajan käämikytkin todellisuudessa säätyy siten, että kiinteistön pääkeskuksilla on 100 % jännitetaso, jonka takia työssä jännitteenalenemaprosentit laskettiin pääkeskukselta molemmille ryhmäkeskuksille, jotka sisältyivät manuaalisesti laskettavaan nousuhaaraan.

5.4 Tulosten vertaileminen

Kolmivaiheisia oikosulkuvirtoja laskettaessa käytettiin IEC 60909-standardin kaavoja, joita myös Neplan-ohjelma käyttää ja tulokset täsmäsivät ohjelmasta saatujen tulosten kanssa. Käsien laskentoja tehtiin vertailun vuoksi myös likiarvoisemmalla menetelmällä, jolloin tulokset poikkesivat ohjelman tuloksista jo selvästi. Tämä osoittaa, että laskelmia ei pidä liiaksi yksinkertaistaa, jotta tulostarkkuus säilyy riittävän hyvänä.

Yksivaiheisia oikosulkuvirtoja laskettaessa käytettiin myöskin IEC 60909 –standardeissa käsiteltyjä kaavoja yksivaiheiselle oikosululle. Verrattaessa Neplan-ohjelmalla tuotettuja arvoja käsien laskettuihin tuloksiin todettiin, että arvot olivat yhteneväiset. Yksivaiheisten oikosulkuvirtojen laskeminen kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskemiseen eroaa siten, että laskentaan otetaan mukaan impedanssin vasta- ja nollakomponentit. Suomessa käytettäville kaapeleille ei ollut kaikilta osin saatavilla tarkkoja sähköisiä arvoja, mikä mahdollisesti aiheuttaa laskennassa jonkin verran epätarkkuutta.

Tuloksia verrattaessa jännitteenalenemien osalta voidaan todeta niiden olevan yhteneväiset. Jännitteenalenemaksi RK 1105-V -ryhmäkeskuksella saatiin 0,8 % ja RK 1106-V -ryhmäkeskuksella 1,89 %. Kyseessä olevat ryhmäkeskukset ovat valaistusta palvelevia ryhmäkeskuksia, joten ohjearvona jännitteenaleneman suurimmalle arvolle voidaan

SFS 6000-standardin mukaan pitää 3 %:a, joten nykyisellä kuormitusarvollaan ryhmäkeskukset ovat sallituissa rajoissa sekä kestävät hieman kuorman lisäämistä.

Ohjelman käyttöä hankaloittavana ja hidastavana tekijänä koettiin se, että Neplan-ohjelmistosta puuttuu Suomessa käytettävien kaapeleiden muodostama kirjasto, jossa olisi tarvittavat sähköiset arvot valmiiksi täydennettynä.

6 Pohdinta

Insinööriyön tavoite teollisuuskiinteistön pienjänniteverkon laskennan ohella oli havainnoida ja tutkia sitä, soveltuuko ohjelma pienjänniteverkostolaskentojen suorittamiseen Hepacon Oy:lle. Neplan on tarkka ja monipuolinen verkostolaskentaohjelma, jolla voidaan suorittaa laskentaa suurillekin verkoille ilman, että siitä tulee visuaalisesti hankalatuultainen. Verkkoa koskevat raja-arvot ovat laskentaa suorittavan henkilön aseteltavissa sekä laskennasta saatavat tulokset voi halutessaan tuottaa taulukoiksi Neplan -ohjelman omalla toiminnoilla tai vaihtoehtoisesti ne voidaan tehdä Excel -taulukko-ohjelman avulla.

Tämän työn aikana havaittiin kuitenkin myös haasteita. Neplan-ohjelma vaatii käyttämiseen hyvää alakohtaista käsitteiden sekä teorian tuntemista, jotka helpottavat ohjelman käyttämistä itsessään sekä tuloksia voidaan analysoida ja muuttaa arvoja tarpeiden mukaan. Ohjelman käyttämistä aloittavan henkilön on hyvä saada opastusta henkilöltä, joka on aiemmin työskennellyt Neplan-ohjelman parissa ohjelmaympäristön tutuksi tulemisen vuoksi. Minulla ei ollut aikaisempaa kokemusta ohjelmasta, mutta sain opastusta ohjelman käyttöön Hepacon Oy:n sisällä sekä oppilaitokselta.

Suomalaisia suunnitteluyrityksiä ajatellen omat haasteensa ohjelman käyttämiseen tuo suomenkielisten ohjeiden puute sekä tarve laatia kirjasto kaapeleista, joita Suomessa käytetään. Jotta Neplan-ohjelmalla voidaan tuottaa tarkkoja sekä mahdollisimman todennukaisia arvoja, täytyy esimerkiksi kaapeleille asettaa täsmälliset arvot. Yrityksen ostamaan lisenssiin kuului myös ”Technical support” eli tekninen tuki, jota myös pyrin hyödyntämään insinööriyön aikana. Ohjelman tekninen tuki sijaitsee ulkomailla, mikä tarkoittaa, että kommunikointikielenä toimii englanti. Jotta käyttömukavuutta Neplan-

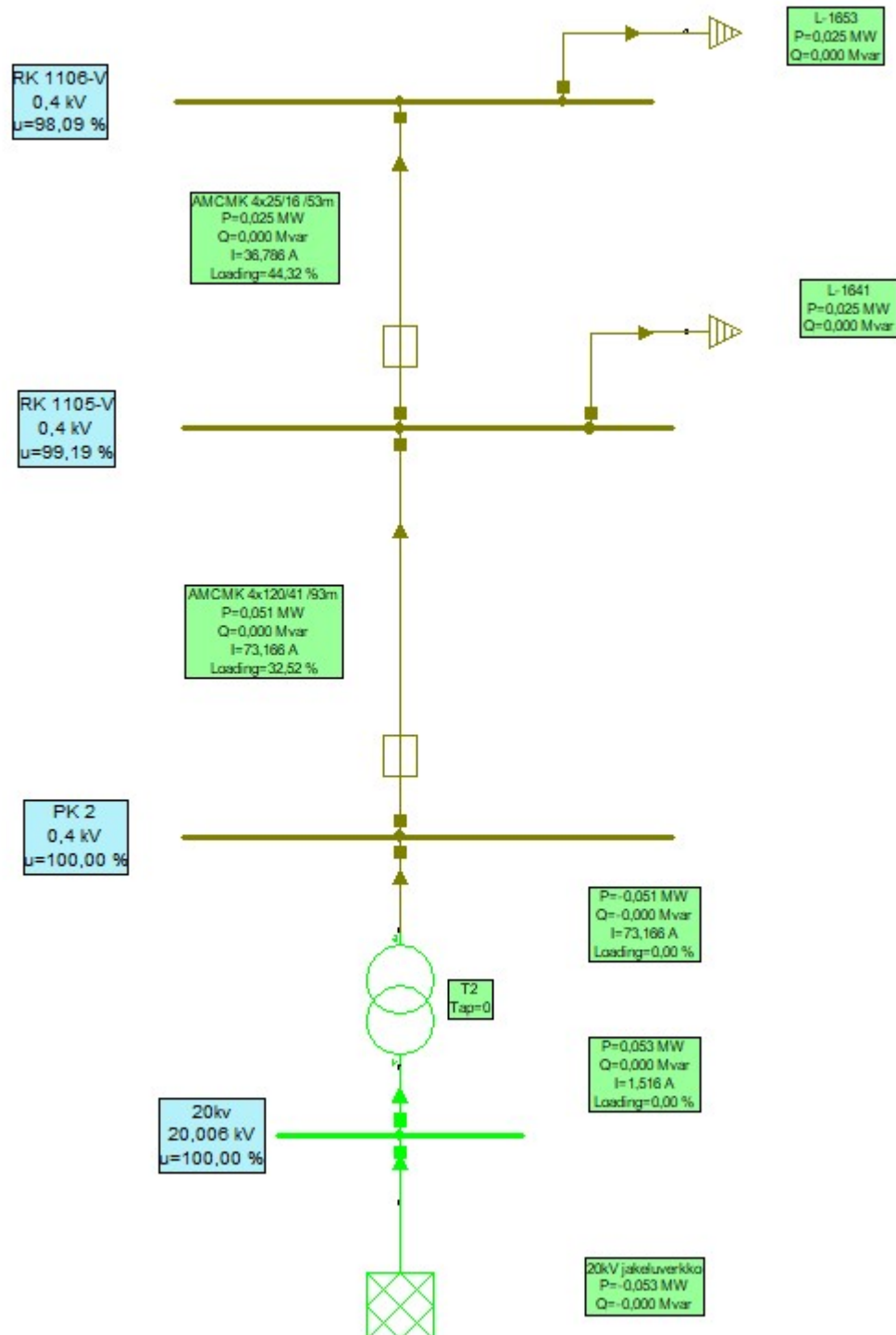
ohjelmaa käyttäville suomalaisille suunnitteluyrityksille sekä oppilaitoksille saataisiin lisättyä, olisi kattavien tukipalveluiden muodostaminen Suomeen merkittävä apu.

Neplan-ohjelmistolla on kätevää suorittaa peruslaskentoja, kuten jännitteenalennemia sekä oikosulkuvirtoja. Mikäli ohjelma saadaan hyödynnettyä mahdollisimman optimaalisesti ja kaikkia sen tarjoamia ominaisuuksiaan, se vaatii runsaasti ajankäyttöä ohjelman parissa, jotta pienjänniteverkon komponenteille osataan asettaa oikeat parametrit sekä verkon komponenteille kohteesta riippuen vallitsevat arvot. Huomioon ottaen suomenkielisten ohjeiden, ohjelmakoulutuksen puuttumisen sekä tarve luoda täsmälliset kaapelikirjastot yrityksen käyttöön, on mahdollisesti jokin toinen verkostolaskentaohjelma, jolla on tarjota tukea suomeksi, käyttäjäystävällisempi sekä nopeammin hallittava suomalaisille sähköosaston sisältävälle suunnittelutoimistolle ohjelman käytön hallitsevan henkilön puuttuessa.

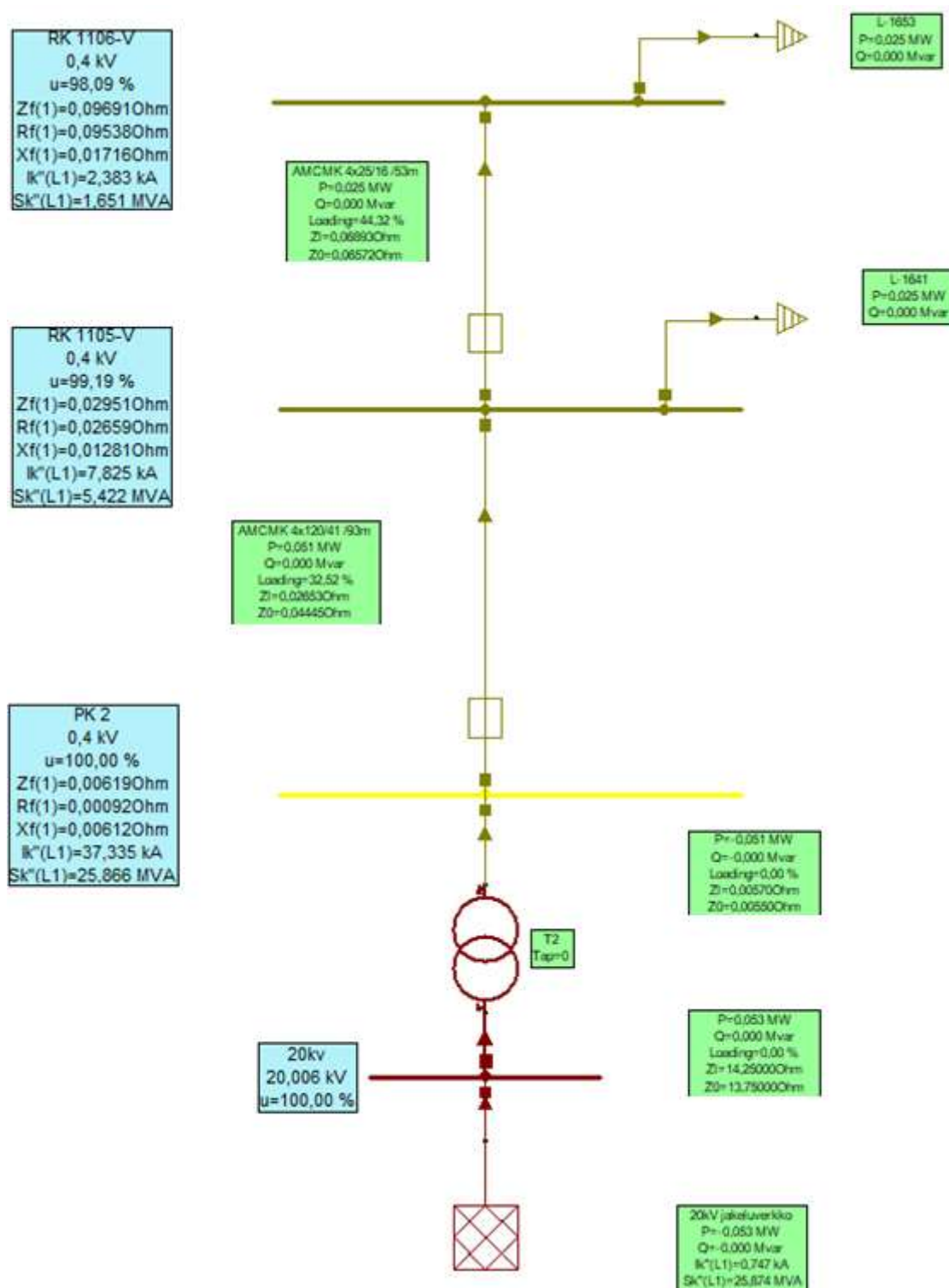
Lähteet

- 1 Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere. Tammertekniikka.
- 2 Siitonen, H. 2016. Verkkoaineisto.
<http://docplayer.fi/3719628-3-sahkon-siirto-ja-jakeluverkot.html>
Luettu 10.2.2018
- 3 Kupari, S. 2015. Luentomateriaali teollisuuden sähköverkot. Helsinki. Metropolia.
- 4 ST-kortti 51.13. Kiinteistön sähköverkon suojauksen selektiivisyys. Severi Sähköinfo Oy.
- 5 D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Helsinki. Sähköinfo Oy.
- 6 SFS-käsikirja 600-1-1, Pienjännitesähköasennukset Osa 1-1: Osat 1-6 Yleiset vaatimukset. Helsinki. SFS.
- 7 Harsia, P. 2008. Johdonsuojakatkaisijan perusteet. Verkkoaineisto.
<http://www2.amk.fi/Ensto/www.amk.fi/opintojak-sot/0705016/1204792797383/1210594480264/1210594509783/1210594818536.html>
Luettu 17.2.2018
- 8 K. Huotari, J. Partanen, 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen.
- 9 Oikosulkusuojaus. ABB TTT-käsikirja 2000-07. Luku 7.
- 10 Sesko ry, 2016. SFS-EN 60909-0:2016 Part 0: Calculation of currents. Helsinki. SFS.

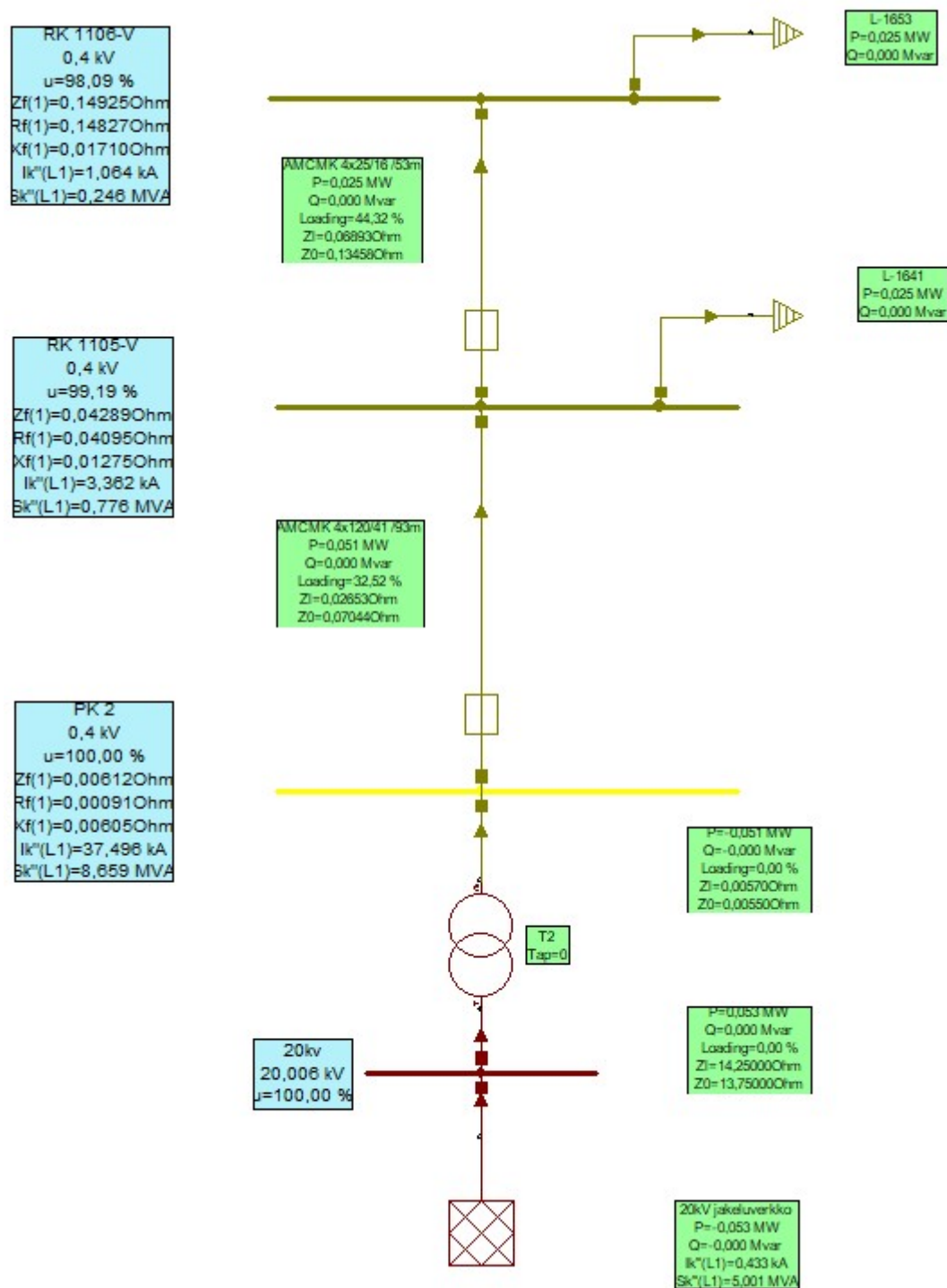
Liite 1. Tehonjakolaskennan tulokset.



Liite 2. Kolmivaiheiset oikosulkuvirrat Neplan –ohjelmalla laskettuna.



Liite 3. Yksivaiheiset oikosulkuvirrat Neplan –ohjelmalla laskettuna.



Liite 4. Sulakkeiden selektiivisyyden tarkastelu.

